

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**MÉMOIRE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE  
INDUSTRIEL  
CONCENTRATION « SÉCURITÉ ET HYGIÈNE INDUSTRIELLES »**

**PAR  
HÉDI ABDELLAOUI**

**Sujet : Évaluation de l'exposition des travailleurs de l'application de peinture  
dans les aires de préparation dans les ateliers du secteur automobile.**

**Décembre 2003**

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## RÉSUMÉ

Pendant les deux dernières décennies, une utilisation croissante des peintures à base d'isocyanates est observée dans l'industrie des services automobiles. Les aires de préparation utilisées dans les ateliers d'automobile pour des réparations mineures de peinture sont généralement prédisposées à une fuite des polluants.

Une évaluation de trois types d'aires de préparation a été effectuée pour déterminer les concentrations des isocyanates qui peuvent être trouvés à proximité des aires de préparation résultant de la fuite des polluants. Les tests de confinement ont été réalisés en utilisant une source de gaz traceur. L'hexafluorure de soufre a été injecté comme un traceur dans la ligne d'air comprimé qui alimente le pistolet de peinture. Les mesures des concentrations de traceur à l'intérieur des aires de préparation ont permis la quantification de l'efficacité de captage tandis que les concentrations de l'extérieur ont été utilisées pour déterminer la perte de confinement. Un échantillonnage des isocyanates et des solvants de peintures a été effectué à différents endroits, à l'intérieur et dans le voisinage des aires de préparation.

Les résultats indiquent que toutes les aires de préparation étaient sujettes à une fuite des contaminants. Étant donné sa sensibilité d'analyse, la méthode par traçage a prouvé une meilleure identification de la fuite des contaminants que la méthode d'échantillonnage de l'IRSST pour les isocyanates (ISO-CHEK<sup>R</sup>). Une aire de préparation avec un plafond soufflant a entraîné une fuite plus élevée due à sa sur-pressurisation ( $Q$  d'alimentation  $> Q$

d'évacuation). L'influence de la conception et des caractéristiques physiques des aires de préparation sur la fuite des polluants est discutée.

## REMERCIEMENTS

Qu'il me soit, avant tout, permis d'exprimer ma reconnaissance à l'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec qui m'a offert l'occasion d'effectuer cette étude.

Je tiens particulièrement à remercier mon co-directeur de recherche M. Louis Lazure, mon directeur de recherche M. Pierre C. Dessureault et M. Jaques Lesage qui, tout au long de la préparation du présent mémoire, ne m'ont pas ménagé leurs encouragements et leur très grande compréhension.

Je tiens à remercier l'Association sectorielle paritaire – Services automobiles, pour son appui à ce travail.

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans la collaboration de plusieurs personnes de l'IRSST.

Je tiens à remercier M. Yves Beaudet, M. Claude Létourneau et M. Rodrigue Gravel du Programme Soutien Analytique, pour leur travail efficace sur le terrain, ainsi que les analystes du Programme Hygiène et Toxicologie, pour leur compétence dans le traitement des échantillons.

Je voudrais en particulier remercier, tous les membres de ma famille et mon ange gardien, qui m'ont soutenu moralement et financièrement tout au long de mes études.

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
RÉSUMÉ.....	i
REMERCIEMENTS.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	xi
 INTRODUCTION.....	 1
CHAPITRE 1: ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	4
1-1 L'exposition aux isocyanates dans les ateliers de carrosserie.....	4
1-1-1 Évaluation toxicologique.....	7
1-1-2 Les normes et le règlement sur les isocyanates.....	8
1-2 Échantillonnage d'isocyanates.....	9
1-3 Systèmes de ventilation des différentes cabines de peinture.....	11
1-3-1 Cabines ouvertes.....	12
1-3-2 Cabine fermée à ventilation verticale.....	12
1-3-3 Cabine fermée à ventilation horizontale.....	15
1-3-4 Cabine fermée à ventilation oblique.....	16
1-3-5 Cabines à toit ouvert et aires de peinture.....	19
1-3-5-1 Cabines à toit ouvert.....	19
1-3-5-2 Aires de peinture.....	19
1-4 Réglementation sur la ventilation industrielle.....	21

1-4-1 Normes NFPA-33 sur les aires de peinture « Prep-Station ».....	22
1-5 L'efficacité de captage.....	23
1-5-1 Principe.....	23
1-5-2 Expression simplifiée de l'efficacité de captage.....	25
1-5-3 Paramètres de contrôle de l'efficacité de captage.....	27
1-6 Les différentes méthodes de gaz traceur.....	29
1-7 Techniques de prélèvement des échantillons et d'émission de gaz traceur.....	32
1-8 Problématique.....	33
1-9 But de l'étude.....	34
CHAPITRE 2: MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE.....	36
2-1 Protocole expérimental.....	36
2-2 Méthodologie et instrumentation.....	37
2-2-1 Évaluation environnementale des différentes aires de préparation.....	37
2-2-1-1 Aire de préparation : « Concept-Prep ».....	38
2-2-1-2 Aire de ponçage à trois postes de travail « Multi-Prep ».....	40
2-2-2 Sites d'échantillonnage.....	44
2-2-3 Description des paramètres fixes.....	46
2-2-4 Description des paramètres variables.....	48
2-2-5 Échantillonnage et analyse d'isocyanate.....	48
2-2-6 Échantillonnage et analyse des solvants.....	50
2-3 Méthode d'évaluation des systèmes de ventilation des aires de préparation.....	51
2-3-1 Échantillonnage de gaz traceur (SF <sub>6</sub> ).....	56
2-3-2 Fréquences des prélèvements.....	57
2- 4 Instrumentation.....	58

2- 5 Analyse statistique.....	59
CHAPITRE 3: INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	61
3-1 Test d'interférences sur l'analyseur multi-gaz (B&K) en présence d'hexafluorure de soufre et de solvants de peinture.....	61
3-2 Données brutes des échantillonnages et des paramètres aérauliques pour chaque aire de préparation.....	63
3-3 Système d'aspiration au plancher avec compensation d'air dans le local (A).....	66
3-3-1 Distribution du SF <sub>6</sub> alentour de l'aire de préparation (A) lors de l'application de la peinture.....	66
3-3-2 Comparaison des concentrations de SF <sub>6</sub> des différents points d'échantillonnage.....	69
3-3-3 L'efficacité du système d'aspiration au plancher avec compensation d'air dans le local (A).....	74
3-4 Système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B).....	79
3-4-1 Distribution du SF <sub>6</sub> alentour de l'aire de préparation lors de la pulvérisation de la peinture.....	79
3-4-2 Comparaison des concentrations de SF <sub>6</sub> des différents points d'échantillonnage.....	82
3-4-3 L'efficacité du système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B)....	87
3-5 Système d'aspiration latéral sans air de compensation (C).....	92
3-5-1 Distribution du SF <sub>6</sub> dans les différents points d'échantillonnage.....	93
3-5-2 Comparaison des concentrations de SF <sub>6</sub> des différents points d'échantillonnage.....	97
3-5-3 L'efficacité du système d'aspiration latéral sans air de compensation (C).....	98



3-6 Concentrations des isocyanates (HDI) et des solvants de peinture au cours d'échantillonnage.....	103
CHAPITRE 4: DISCUSSION.....	108
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	119
RÉFÉRENCES.....	121
ANNEXES.....	126
Annexe A: Calcul simplifié de la composante aléatoire de l'incertitude sur $C_3$ (95 %).....	126
Annexe B : Cabine (A) : Statistiques des données d'échantillonnage de $SF_6$ au poste 1 lors de l'application de la peinture.....	127
Annexe C : Cabine (A) : Statistiques des données d'échantillonnage de $SF_6$ au poste 2 lors de l'application de la peinture.....	130
Annexe D : Cabine (A) : Statistiques des données d'échantillonnage de $SF_6$ au poste 3 lors de l'application de la peinture.....	133
Annexe E : Cabine (A) : Statistiques des données d'échantillonnage de $SF_6$ au poste 4 lors de l'application de la peinture.....	136
Annexe F : Cabine (A) : Statistiques des concentrations de $SF_6$ dans la cheminée lors de l'application de la peinture.....	138
Annexe G : Cabine (A): Statistiques des concentrations de $SF_6$ dans la cheminée lors d'une injection directe dans le conduit d'évacuation...	141
Annexe H : Cabine (B): Statistiques des concentrations de $SF_6$ au poste 1 lors de l'application de la peinture.....	144
Annexe I : Cabine (B): Statistiques des concentrations de $SF_6$ au poste 2 lors de l'application de la peinture.....	147

Annexe J : Cabine (B): Statistiques des concentrations de SF <sub>6</sub> au poste 3 lors de l'application de la peinture.....	150
Annexe K : Cabine (B): Statistiques des concentrations de SF <sub>6</sub> au poste 4 lors de l'application de la peinture.....	153
Annexe L : Cabine (B): Statistiques des données d'échantillonnage de SF <sub>6</sub> au poste sur le toit lors de l'application de la peinture.....	156
Annexe M : Cabine (B): Statistiques des données d'échantillonnage de SF <sub>6</sub> dans la cheminée lors de l'application de la peinture.....	159
Annexe N : Cabine (B): Statistiques des données d'échantillonnage de SF <sub>6</sub> dans la cheminée lors d'une injection directe dans le conduit d'extraction.....	162
Annexe O : Cabine (C): Statistiques des données d'échantillonnage de SF <sub>6</sub> au poste1 lors de l'application de la peinture.....	165
Annexe P : Cabine (C): Statistiques des données d'échantillonnage de SF <sub>6</sub> au poste 2 lors de l'application de la peinture.....	168
Annexe Q : Cabine (C): Statistiques des données d'échantillonnage de SF <sub>6</sub> au poste 3 lors de l'application de la peinture.....	171
Annexe R : Cabine (C): Statistiques des données d'échantillonnage de SF <sub>6</sub> au poste 4 lors de l'application de la peinture.....	174
Annexe S : Cabine (C): Statistiques des données d'échantillonnage de SF <sub>6</sub> dans la cheminée lors de l'application de la peinture.....	177

## LISTES DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1 : Paramètres aérauliques et les concentrations d'hexafluorure de soufre dans la cheminée lors de la pulvérisation de peinture aux trois aires de préparation.....	65
Tableau 2 : Les données de base des quatre points d'échantillonnage de (A).....	70
Tableau 3 : Résultats du test ANOVA effectué sur les concentrations de SF <sub>6</sub> des quatre points d'échantillonnage de (A) .....	70
Tableau 4 : Les données de base des trois points d'échantillonnage de (A).....	71
Tableau 5 : Résultats du test ANOVA effectué sur les concentrations de SF <sub>6</sub> des trois points d'échantillonnage de (A) .....	72
Tableau 6 : Les données de base des trois points d'échantillonnage de (A) .....	73
Tableau 7 : Résultats du test ANOVA effectué sur les concentrations de SF <sub>6</sub> des deux groupes de (A) .....	73
Tableau 8 : L'efficacité du système d'aspiration au plancher avec compensation d'air dans le local (A).....	78
Tableau 9 : Paramètres d'évaluation de l'efficacité du système d'aspiration au plancher avec compensation d'air dans le local (A).....	79
Tableau 10: Les données de base des quatre points d'échantillonnage de (B).....	83
Tableau 11: Résultats du test ANOVA effectué sur les concentrations de SF <sub>6</sub> des quatre points d'échantillonnage de (B) .....	83
Tableau 12 : Les données de base des deux points d'échantillonnage de (B).....	84

Tableau 13 : Résultats du test ANOVA effectué sur les concentrations de SF <sub>6</sub> des deux points d'échantillonnage de (B).....	84
Tableau 14 : Les données de base des deux groupes de (B).....	85
Tableau 15 : Résultats du test ANOVA effectué sur les concentrations de SF <sub>6</sub> des deux groupes de (B) .....	85
Tableau 16 : Les données de base des deux groupes de (B) .....	86
Tableau 17 : Résultats du test ANOVA effectué sur les concentrations de SF <sub>6</sub> des deux groupes de (B).....	87
Tableau 18 : L'efficacité du système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B)...	91
Tableau 19 : Paramètres d'évaluation du système d'aspiration latéral sans air de compensation.....	92
Tableau 20 : les données de base des quatre points d'échantillonnage de (C) .....	97
Tableau 21 : Résultats du test ANOVA effectué sur les quatre points d'échantillonnage de (B).....	98
Tableau 22 : L'efficacité de confinement du système d'aspiration latéral sans air de compensation.....	102
Tableau 23 : Paramètres d'évaluation de l'efficacité du système d'aspiration latéral sans air de compensation (C).....	103
Tableau 24 : Concentrations des isocyanates (HDI) et des solvants de peinture dans les trois aires de préparation.....	105
Tableau 25 : Rm des solvants de peinture dans chaque aire de préparation.....	107

## LISTES DES FIGURES

	Page
Figure 1. Cabine de peinture fermée à ventilation verticale.....	14
Figure 2. Cabine de peinture fermée à ventilation horizontale.....	16
Figure 3. Cabine de peinture fermée à ventilation oblique.....	18
Figure 4. Croquis du système d'aspiration au plancher.....	40
Figure 5. Croquis du système de ventilation oblique.....	42
Figure 6. Croquis du système de ventilation semi oblique.....	44
Figure 7. Postes d'échantillonnages dans les aires de préparation.....	46
Figure 8. Système d'échantillonnage pour les isocyanates.....	49
Figure 9. Montage de la méthode de gaz traceur.....	55
Figure 10. Variations des concentrations de SF <sub>6</sub> lors d'une injection de 10 mL de solvants de peinture.....	62
Figure 11. Variations des concentrations de SF <sub>6</sub> lors d'une injection de 5 µL de solvants de peinture.....	63
Figure 12. Variation de la concentration de SF <sub>6</sub> dans le voisinage de l'aire de préparation (A) .....	68
Figure 13. Variations expérimentale et théorique des concentrations de SF <sub>6</sub> dans la cheminée lors d'une injection directe dans le fosse d'extraction de (A).....	75
Figure 14. Variation de débit d'injection et de la concentration de SF <sub>6</sub> dans la cheminée lors de l'application de la peinture dans l'aire de préparation (A)...	77

Figure 15. Variations des concentrations de $\text{SF}_6$ aux points d'échantillonnage au cours de la pulvérisation de peinture dans l'aire de préparation (B).....	81
Figure 16. Variations de la concentration expérimentale et théorique du $\text{SF}_6$ dans la cheminée lors d'une injection directe dans les grilles d'extraction de (B).....	88
Figure 17. Variation de débit d'injection et de la concentration de $\text{SF}_6$ dans la cheminée lors de l'application de la peinture dans (B) .....	90
Figure 18. Variations de la concentration de $\text{SF}_6$ dans le voisinage de l'aire de préparation (C).....	94
Figure 19. Variation de la concentration de $\text{SF}_6$ dans la zone de pulvérisation au plénum et au-dessus du rideau de (C).....	96
Figure 20. Variations de débit d'injection et de la concentration de $\text{SF}_6$ dans la cheminée de (C).....	99
Figure 21. Variation de la concentration de $\text{SF}_6$ dans la cheminée lors d'une injection directe dans les grilles d'extraction de (C).....	101

## INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, des polymères à base d'isocyanates sont utilisés comme durcisseurs dans l'industrie des services automobiles. Les isocyanates peuvent présenter de graves dangers pour la santé des travailleurs qui les utilisent. Au Québec, l'analyse des indemnités versées par la CSST à la suite d'un diagnostic d'asthme professionnel montre que les isocyanates représentent l'agent sensibilisant le plus important. Cependant, en raison des propriétés des produits, cela n'empêche pas qu'ils soient de plus en plus utilisés dans l'industrie. Selon Delfosse et Laureillard (1990), peu de consommateurs accepteraient de sacrifier la brillance, la dureté et la résistance des peintures aux isocyanates, qui ont conquis le vaste marché de l'automobile dans les années 80. Ces utilisations dans le secteur automobile n'ont cessé de croître. Cette croissance est associée à la grande diversité des types de polymères à base d'isocyanates. Parallèlement à cet accroissement, les effets des isocyanates sur la santé des travailleurs commencent à se manifester avec l'apparition de cas d'intoxications aiguës, d'atteintes fonctionnelles respiratoires aiguës et chroniques et d'asthme professionnel.

D'après Malo (1989), l'asthme professionnel compte parmi les atteintes à la santé les plus fréquentes causées par les isocyanates. Selon Patterson (1987), un travailleur déjà sensibilisé peut être victime d'une crise d'asthme lorsqu'il est exposé à des concentrations aussi basses que 0,2 parties par milliard (ppb).

L'organisme américain "National Institute of Occupational Safety and Health" (NIOSH) a publié un rapport sur l'exposition au toluène diisocyanate (TDI), dans lequel il

mentionne que 5 à 10 % des travailleurs exposés à une forte concentration d'isocyanates développent une sensibilisation de type allergique à ces substances.

Parmi les utilisateurs de produits à base d'isocyanates, on trouve l'industrie des services automobiles. Il s'agit, entre autres, des commerces de détail de véhicules automobiles et des ateliers de réparation de carrosserie. Une enquête effectuée par l'Association Sectorielle Paritaire Auto Prévention (ASP auto prévention) concluait que presque la totalité des entreprises effectuant des travaux de peinture utilisent des isocyanates.

Depuis le début de l'automne 1998 un comité provincial sur les isocyanates a été mis sur pied par la CSST et regroupe des intervenants de la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST), des Régies régionales de la santé et des services sociaux et les centres locaux de services communautaires (CLSC), de l'association sectorielle paritaire d'automobiles et de l'IRSST. Le but de ce comité est de documenter les risques d'exposition aux isocyanates dans l'ensemble des situations d'exposition professionnelle et d'uniformiser les protocoles d'intervention, de dépistage et de diagnostic de l'asthme.

En raison du nombre de cas d'asthme, le secteur de l'application de peinture automobile constitue une priorité d'intervention. En collaboration avec l'ASP automobile, l'IRSST a déjà effectué deux études sur l'évaluation des niveaux d'exposition et des performances des cabines à peinture (Goyer et Lesage (1989), Goyer (1993)).

Cependant, dans ces établissements, une nouvelle technologie d'utilisation de l'aire de préparation ventilée "Prep-Station" pour des travaux d'application de peinture hors cabine est apparue récemment. Cette technologie attire notre attention et soulève des inquiétudes. Actuellement, les performances de cette installation n'ont pas été documentées quant aux niveaux potentiels d'exposition et de l'efficacité d'élimination des contaminants



dans l'air. Dans cette étude, des évaluations sur le terrain ont été effectuées avec la collaboration de l'Association sectorielle paritaire-services automobiles dans le but de déterminer si, dans les aires de préparation ventilées, le système de ventilation élimine correctement les contaminants. Pour étudier les expositions aux isocyanates des peintres et des travailleurs situés dans l'environnement immédiat des aires de préparation dans les ateliers du secteur automobile, deux méthodes ont été utilisées :

- La méthode d'échantillonnage de l'IRSST pour l'isocyanate et les vapeurs de solvants (ISO-CHEK<sup>R</sup>) ;
- La méthode de gaz traceur : l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) a été utilisé comme gaz traceur.

Ces deux méthodes ont été utilisées pour évaluer le rendement du dispositif de ventilation et l'efficacité de captage des différents types d'aires de préparation et déterminer la dispersion des polluants dans chaque atelier.

Cette étude permet de documenter l'efficacité des mesures préventives disponibles lors de la pulvérisation de revêtement aux isocyanates, afin de formuler les limitations d'utilisation de ces équipements et de faire des recommandations permettant une utilisation sécuritaire des peintures à base d'isocyanates. Elles serviront de données de base aux fabricants pour le développement futur de telles installations.

## CHAPITRE I

### ÉTAT DES CONNAISSANCES

#### **1-1/ L'exposition aux isocyanates dans les ateliers de carrosserie**

La nature complexe de l'exposition aux isocyanates dans différents environnements peut être généralisée de la façon suivante. Plusieurs polluants sont émis dans l'environnement de travail lors de la réaction de polymérisation des isocyanates. Selon le procédé et le stade de la réaction, les isocyanates sont libérés dans l'environnement en différentes proportions sous formes de monomères et d'oligomères. Selon Streicher (2002) et Lesage et collaborateurs (1992), le type de procédé et les propriétés physiques des produits modifient la génération dans l'air de ces monomères et oligomères en phase gazeuse ou aérosol.

L'exposition des travailleurs dans le groupe des oligomères se caractérise par une matrice de polluants qui se forme principalement d'oligomères sous forme d'aérosol, et une proportion plus faible de monomères présents sous forme de gaz et d'aérosol. On utilise des isocyanates dans la préparation du produit de revêtement ; avant son application, ils sont contenus dans une substance qui doit être ajoutée à la résine de base juste avant l'application : le catalyseur, activateur ou durcisseur. Les oligomères y sont présents dans des proportions allant de 10 % à 90 % de la masse, alors que les monomères n'en excèdent généralement pas 1 %.

Les revêtements contenant des isocyanates comportent des avantages qu'aucun atelier de carrosserie ne peut négliger : ils permettent d'obtenir un fini offrant une résistance

considérable à l'abrasion, aux chocs, aux UV, aux vibrations et aux divers agents chimiques, tout en conservant les qualités de souplesse nécessaires pour les travaux de carrosserie : facilité d'utilisation, compatibilité avec les équipements de pulvérisation courants, petite quantité requise.

Si l'on trouve parfois des isocyanates dans les mastics à carrosserie et dans les apprêts surfaçant, ils sont surtout présents dans les apprêts et les produits de finition. Dans ces derniers on utilise généralement des peintures à deux composantes pour la finition. La technique la plus répandue aujourd'hui, connue sous l'appellation de «couche de base-verniss» (basecoat/ clear-coat), se fait en deux étapes. On applique d'abord le produit de base, qui contient les pigments, et ensuite le vernis, qui procure le lustre. Chaque étape peut nécessiter l'application de plusieurs couches. Or, comme les deux revêtements peuvent contenir des produits à base d'isocyanates, la même prudence est de rigueur tout au cours des opérations.

La pulvérisation permet l'étalement uniforme de la peinture et procure les qualités de finis tant recherchées. Ce procédé présente toutefois des inconvénients :

- Production de vapeurs et d'aérosols respirables contenant des isocyanates et des solvants, liants et pigments qui composent la peinture ;
- Augmentation des risques d'incendie et d'explosion par la production de vapeurs et l'optimisation du mélange air-produit inflammable.

Il existe différents procédés de pulvérisation, mais c'est surtout la pulvérisation HVLP (High Volume Low Pressure) et la pulvérisation pneumatique qu'utilisent les ateliers de réparation de carrosseries d'automobiles. Les autres procédés, soit la pulvérisation électrostatique, la pulvérisation sous haute pression (airless) et la pulvérisation mixte (airmix), ne sont généralement pas utilisés en carrosserie.

Le procédé à pulvérisation pneumatique permet de créer le mélange air-peinture, de contrôler le débit d'air et de peinture ainsi que d'ajuster la forme du jet pulvérisé. Ces équipements permettent de travailler avec de petites quantités de peinture (environ un litre).

Le principe de fonctionnement est le suivant : un mince filet de peinture est dirigé, par gravité ou par succion, vers un jet d'air comprimé, où il est alors atomisé en fines gouttelettes et projeté vers la pièce à peindre. Ce procédé occasionne des pertes de produits importantes en créant un brouillard de sur-pulvérisation attribuable à deux facteurs :

- Une partie des gouttelettes pulvérisées n'atteignent pas l'objet à peindre ;
- Une seconde portion, importante, rebondit sur la pièce.

Le procédé à pulvérisation HVLP est de plus en plus répandu au Québec, cette technique semblable à la pulvérisation pneumatique conventionnelle, utilise aussi l'air comprimé pour atomiser la peinture pulvérisée. Comme son nom l'indique, elle utilise cependant un plus grand volume d'air et un niveau de pression beaucoup plus bas, réduisant ainsi considérablement le brouillard de sur-pulvérisation et augmentant considérablement le taux de transfert.

Des systèmes à turbine, n'utilisant pas de compresseur, existent aussi pour la pulvérisation HVLP. Tous les tests effectués dans cette étude sont basés sur l'utilisation du pistolet HVLP.

### **1-1-1/ Évaluation toxicologique**

Les peintures contiennent beaucoup de produits chimiques dangereux, y compris des solvants organiques, des métaux toxiques et des isocyanates. Les recherches de Yu-Mei (2002), montrent que les hauts risques de cancer du poumon, la leucémie, le cancer de foie, le cancer de l'estomac et le cancer de la vessie sont reliés à l'exposition aux peintures à long terme. Des études complémentaires associent des symptômes neurophysiologiques et le dysfonctionnement du système nerveux central à une lourde exposition aux solvants de peinture.

D'après Malo et collaborateurs (1989), la liste des produits pouvant causer de l'asthme professionnel contient plus de 100 substances. La famille des isocyanates fait partie de cette liste. Les isocyanates peuvent entraîner plusieurs types de maladies respiratoires comme l'intoxication aiguë, l'atteinte fonctionnelle respiratoire aiguë et chronique, l'asthme professionnel. Selon Penman et collaborateurs (1982), l'intoxication aiguë survient à des expositions environnementales dépassant les 0,2 ppm. De nombreux cas de ces intoxications ont été rapportés dans la littérature. Ces intoxications se caractérisent par des symptômes et signes d'irritations conjonctivales et nasales.

L'atteinte fonctionnelle respiratoire obstructive aiguë et chronique a été observée chez des travailleurs exposés quotidiennement à des concentrations d'isocyanates inférieures à 0,02 ppm. L'exposition par inhalation entraîne des symptômes ressemblant à de l'asthme :

sifflements, serremments de poitrine, souffle court, respiration difficile, toux, fièvre, frissons, nausées, perte d'appétit. Les symptômes apparaissent immédiatement ou plusieurs heures après l'exposition. L'exposition à des concentrations élevées peut conduire à une bronchite chimique et à une accumulation de liquide dans les poumons (œdème pulmonaire) pouvant être fatale. Une irritation respiratoire peut être remarquée dès 0,1 ppm.

Considérant que, dans les différents mécanismes proposés, le déclencheur de l'asthme demeure la fonction NCO, une toxicité équivalente pour les monomères et les oligomères doit donc être envisagée. Cependant en raison de la complexité de l'exposition, très peu d'études ont été effectuées pour évaluer la toxicité des oligomères. Les produits incriminés dans les pathologies respiratoires des carrossiers et des peintres sont essentiellement les isocyanates qui sont un des composants chimiques des peintures polyuréthannes. En pratique, lorsqu'un peintre devient allergique aux isocyanates, il faut qu'il change de métier. Cette pathologie doit être déclarée en maladie professionnelle.

### **1-1-2/ Les normes et le règlement sur les isocyanates**

Le risque respiratoire existe essentiellement lors des activités de préparation et d'application des peintures. Ces peintures et apprêts contiennent des oligomères dont les composés dangereux sont les «isocyanates».

La pulvérisation des peintures au pistolet conventionnel ou HVLP engendre un aérosol de fines gouttelettes en isocyanates qui vont être inhalées et pénétrer dans les poumons au niveau des bronches, notamment si le pistolage s'effectue dans une cabine mal ventilée ou sans protection respiratoire efficace.

Selon le Règlement sur la santé et la sécurité du travail du Québec (2001), l'employeur doit prendre toutes les mesures nécessaires, au moyen de contrôles techniques, de pratiques de travail et d'hygiène et d'installations d'hygiène, afin d'assurer que l'exposition moyenne pondérée selon la durée des travailleurs au toluène-diisocyanate (TDI), au méthylène-diphénylisocyanate (MDI), à l'hexaméthylène-diisocyanate-1,6 (HDI) ou à l'isophorone-diisocyanate (IPDI) soit ramenée au niveau le plus bas possible, mais ne dépasse en aucun cas la concentration de 0,005 ppm d'isocyanate dans l'air. D'après le Règlement sur la santé et la sécurité du travail du Québec (2001), le VEMP est de 0,005 ppm, les isocyanates sont considérés comme très toxiques, cependant en raison de leur très faible pression de vapeur ( $<0,05$  mm de Hg comparativement à 18 mm de Hg pour l'eau) et de leur densité de vapeur élevée (soit 6 à 9 fois plus lourde que l'air) l'exposition dans l'air est techniquement contrôlable.

Les personnes sujettes à des allergies qui ont été sensibilisées aux isocyanates ou même qui n'ont jamais été exposées aux isocyanates peuvent présenter des symptômes à des concentrations de seulement 1,4 ppb. Les asthmatiques ou les personnes chez qui une dermatite de contact apparaît facilement ne devraient donc pas être exposées aux isocyanates. L'odeur d'isocyanate ne permet pas d'empêcher la surexposition car son seuil de perception olfactive est élevé.

### **1-2/ Échantillonnage d'isocyanates**

D'après un extrait de la Gazette officielle du Québec (2001), le Règlement sur la santé et la sécurité du travail au Québec, les gaz et les aérosols présents dans le milieu de travail doivent être prélevés et analysés de manière à obtenir une précision équivalente à

celle obtenue en appliquant les méthodes décrites dans le guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail publié par l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. La stratégie d'échantillonnage de ces contaminants doit être appliquée selon les pratiques usuelles de l'hygiène industrielle.

L'échantillonnage des atmosphères de travail n'est pas un simple instrument de connaissance, mais un outil pour la prévention des pathologies professionnelles et l'amélioration des conditions de travail. En hygiène industrielle, l'évaluation d'un polluant dans l'air passe par la mise au point d'une méthode de captage du polluant, et par la mise au point d'une méthode analytique. Ce chapitre traitera des critères de sélection et de l'évaluation d'un système d'échantillonnage pour les différents isocyanates présents dans l'environnement sous la forme gazeuse ou aérosol. Dans le cas des isocyanates dans le domaine de l'application de peinture, les méthodes d'analyse se doivent d'être sensibles et spécifiques pour quantifier les isocyanates (HDI et IPDI) présents, sous forme de monomère et d'oligomère tout en demandant un temps d'échantillonnage court (15 minutes), qui s'associe mieux aux procédés de peinture dans les aires de préparation.

Selon E. Podolak (1987), et Niosh Manual of Analytical Methods (1977), il existe plusieurs méthodes pour doser les principaux isocyanates par échantillonnage sur filtre imprégné, sur tube imprégné ou dans des barboteurs suivis d'une analyse par colométrie ou chromatographie. Depuis 1987, l'IRSST a mis au point une méthode innovatrice permettant d'évaluer l'exposition à des très faibles concentrations d'isocyanates. La «méthode IRSST» a été officiellement adoptée en 1996 par l'American Society for testing and Materials



(ASTM), et est aujourd'hui distribuée dans 24 pays par la société américaine Omega Specialties.

Dans cette étude, la méthode d'échantillonnage de l'IRSST # 234-2 a été utilisée pour échantillonner l'isocyanate sous forme de gaz et d'aérosol dans les aires de peinture "Prep-Station".

### **1-3/ Systèmes de ventilation des différentes cabines de peinture**

Le poste de peinture peut être une cabine ouverte, une cabine fermée, un tunnel, une cabine à toit ouvert ou une aire de peinture. D'après l'Institut National de Recherche et de Sécurité (1986), on choisit l'un ou l'autre de ces systèmes selon la dimension et le poids des objets, la fréquence et la cadence des travaux, la qualité du revêtement.

Une cabine de peinture est une aire d'application de peinture par pulvérisation limitée par des parois destinées à empêcher la diffusion de l'aérosol à l'extérieur. Pour toutes ces installations, il est nécessaire de disposer d'une arrivée d'air de compensation assurant le confort physiologique du peintre. L'air pollué doit être épuré. Elle est équipée de filtres pour retenir les poussières solides à l'entrée de l'air neuf. À la sortie de l'air, avant rejet à l'extérieur, les poussières solides provenant de l'aérosol en excès sont retenues par un filtre ou par un système de lavage à eau pulvérisée. Il est à noter que les filtres de plafond ou de sol ont une autre fonction importante qui est d'homogénéiser la vitesse de l'air à travers les surfaces de soufflage et d'extraction.

On trouve dans les ateliers de réparation de carrosseries d'automobiles trois types de cabines ou de chambres de peinture que l'on peut identifier par la ventilation qu'elles procurent : horizontale, oblique ou verticale.

### **1-3-1 / Cabines ouvertes**

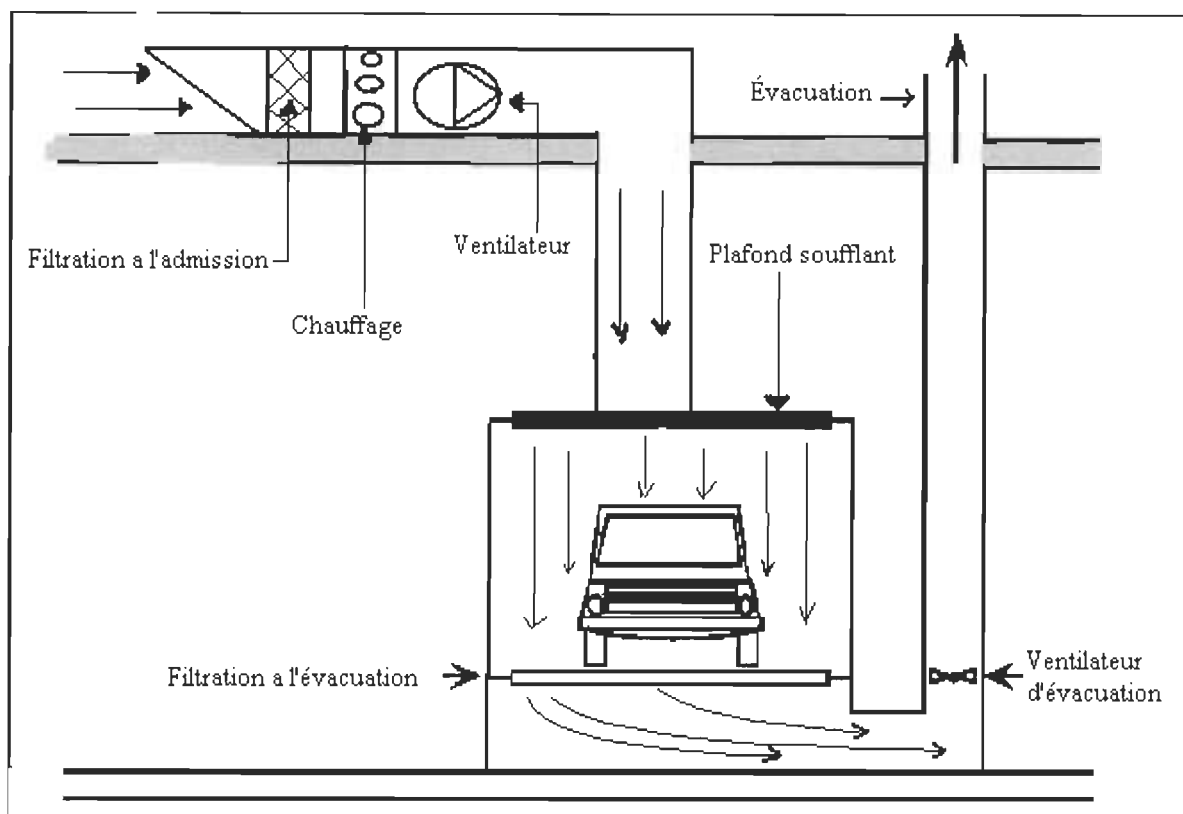
Les cabines ouvertes sont de deux types ; cabines pour peintre placé à l'extérieur et cabines pour peintre placé à l'intérieur. Les cabines pour peintre placé à l'extérieur sont des enceintes ventilées de petites dimensions placées à la hauteur d'un homme. Elles sont employées pour la peinture par pulvérisation de petits objets peints manuellement. Un support pivotant, permet de peindre les objets sur toutes leurs faces. L'opérateur doit toujours diriger son pistolet vers l'intérieur de la cabine. L'aérosol de peinture en excès est aspiré par un système de ventilation. L'air de ventilation provient par conséquent de l'atelier dans lequel est installée la cabine.

Selon l'Institut National de Recherche et de Sécurité (1988), le plafond d'une cabine ouverte doit être au moins à 0,3 m au-dessus de l'objet à peindre. En largeur, la cabine doit avoir au minimum 1,2 m de plus que l'objet. La profondeur et la distance doivent être suffisantes pour que l'aérosol de peinture ne ressorte pas de l'enceinte ventilée. D'après le Guide pratique de ventilation de l'INRS (1987), la vitesse moyenne d'air d'une cabine ouverte est supérieure ou égale à 0,6 m/s avec un débit de l'ordre de 2,75 m<sup>3</sup>/s.

### **1-3-2 / Cabine fermée à ventilation verticale**

Selon le Guide pratique de ventilation de l'INRS (1987), les cabines à ventilation verticale sont aujourd'hui considérées comme les équipements les plus efficaces sur le

marché. Il s'agit d'équipements entièrement fermés et pratiquement étanches, d'où l'appellation chambre plutôt que cabine. Sur le plan de l'apport d'air, elles sont équipées de leur propre système de compensation qui, par un plenum situé au-dessus du plafond, distribue de l'air traité et filtré à l'intérieur de la chambre. L'air circule ensuite verticalement et est évacué au travers des grilles d'évacuation, qui forment une partie ou la totalité du plancher de l'installation. Le déplacement d'air se fait du haut vers le bas, ce qui diminue la possibilité de fortes concentrations de contaminants dans la zone respiratoire du peintre (Figure 1). D'après le Guide de ventilation de la CSST (1998), dans certaines cabines, des mouvements d'air tourbillonnaires se forment dans la zone de peinturage et rabattent vers le peintre une partie de l'aérosol de peinture.



**Figure 1. Cabine de peinture fermée à ventilation verticale**

Ces chambres sont habituellement munies de deux ventilateurs, l'un assurant l'apport d'air neuf et l'autre, son extraction, et d'un système de traitement de l'air frais. Les chambres à ventilation verticale permettent généralement le séchage de la peinture à haute température. Durant la pulvérisation de la peinture, il n'y a aucune recirculation, alors que durant la phase de séchage, le système de ventilation de la cabine n'admet qu'un minimum d'air frais, soit environ 10 %, et recircule 90 % de l'air préchauffé. Ce procédé permet au système de compensation de réchauffer l'air et d'atteindre des températures voisines de 50 °C. Celles-ci assurent le séchage de la peinture généralement en moins d'une heure.

L'Institut National de Recherche et de Sécurité (1988), a souligné l'existence aussi des cabines fermées à ventilation verticale fractionnée, l'espace intérieur est divisé en

tronçons ventilables d'environ 6 mètres. Lorsque le peintre se déplace de la gauche vers la droite, un dispositif déclenche successivement la ventilation des tronçons. Dans ces cabines particulières, il faut empêcher que la pulvérisation puisse se faire dans une zone non ventilée.

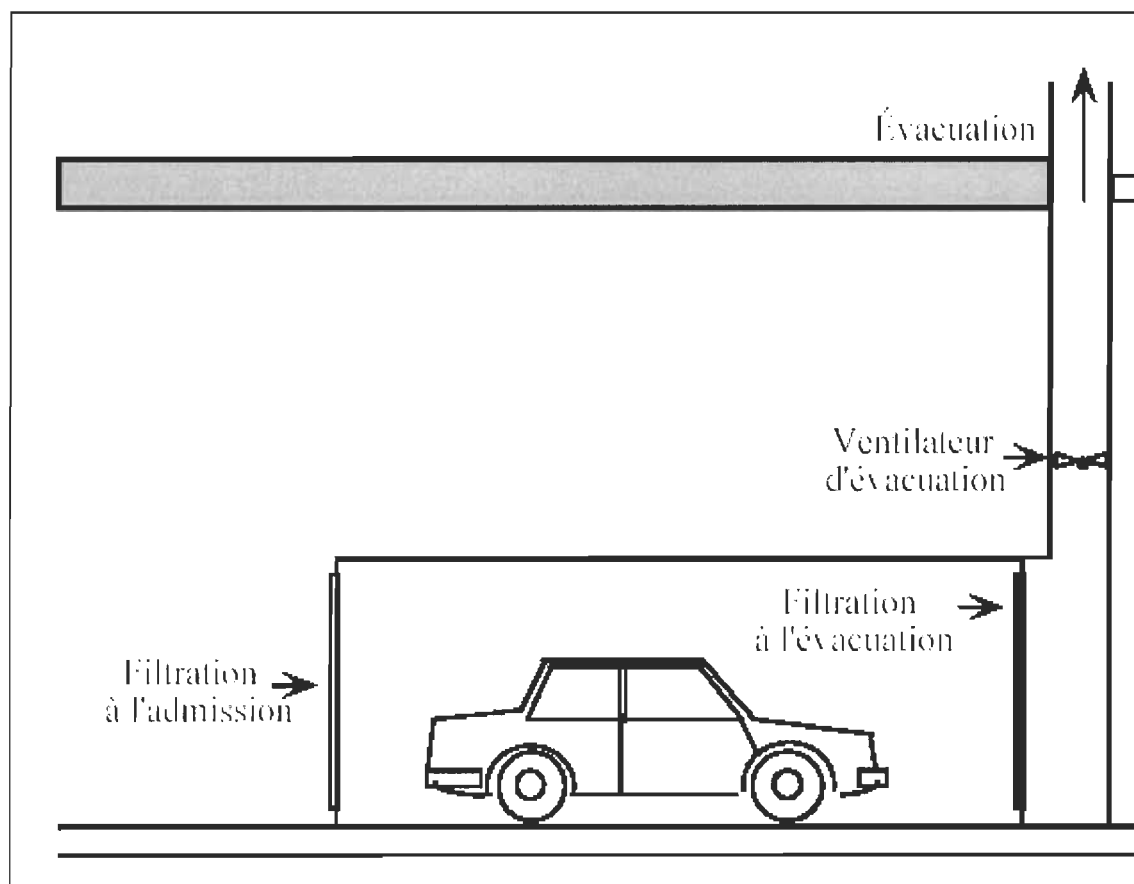
D'après Goyer et Lesage (1989), l'utilisation d'un système de ventilation verticale a déjà été reconnu comme solution efficace pour contrôler l'exposition des travailleurs dans des cabines à peinture fermées. Une étude réalisée par l'IRSST a démontré que l'efficacité de cette ventilation était variable, dans cette étude les chercheurs ont étudié la performance de la ventilation verticale dans les cabines à peinture en identifiant les paramètres qui influencent les concentrations des polluants présents dans l'atmosphère de travail lors des applications de peinture.

### **1-3-3 / Cabine fermée à ventilation horizontale**

L'Institut National de Recherche et de Sécurité (1986), a mentionné le principe de fonctionnement de la cabine fermée à ventilation horizontale. L'air est introduit à travers des filtres secs disposés sur une paroi et ressort à travers d'autres filtres secs ou à travers un système de lavage à l'eau analogue à celui des cabines ouvertes.

Les cabines de peinture à ventilation horizontale sont en fait les premières de cette catégorie d'équipements, de fabrication industrielle, à être apparues sur le marché. Elles assurent un déplacement d'air longitudinal, parallèle au véhicule à peindre (Figure 2). L'air est admis par les portes de la cabine, qui sont munies de filtres empêchant l'entrée des poussières durant les travaux de pulvérisation. L'air circulant dans la cabine provient donc de l'atelier où celle-ci est située.

L'air vicié est filtré et évacué de la cabine par l'extrémité opposée à l'admission. Afin d'éviter la dispersion excessive de contaminants dans l'atmosphère, des filtres mécaniques interceptent les particules solides, mais aucune autre filtration ne capte les gaz, vapeurs et aérosols de faible diamètre.



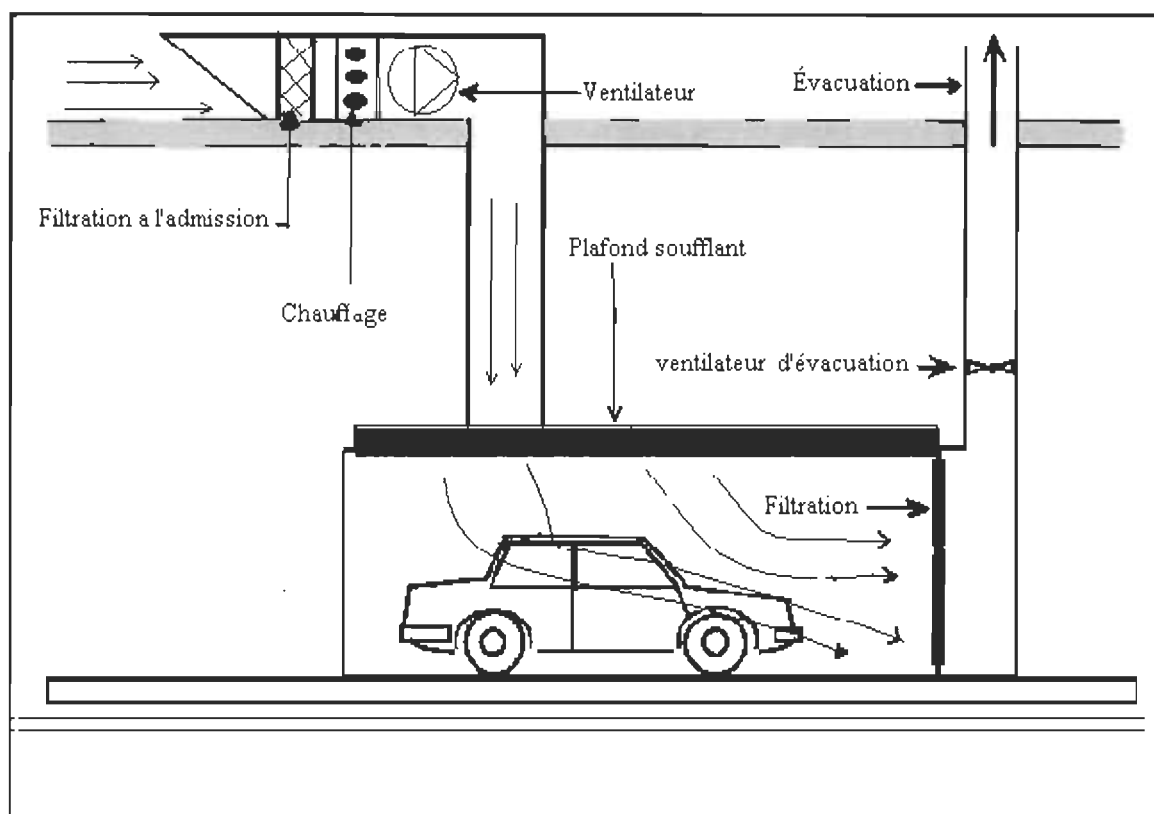
**Figure 2. Cabine de peinture fermée à ventilation horizontale**

#### **1-3-4 / Cabine fermée à ventilation oblique**

Selon le Guide pratique de ventilation de l'INRS (1998) et Vincent (2000), l'air qui circule dans la cabine est introduit par le plafond à proximité de l'entrée de la cabine et est

aspiré à l'autre extrémité soit par le sol, soit par la paroi verticale à travers un filtre sec ou un système de lavage à l'eau.

Ces cabines de peinture sont un compromis entre les cabines à ventilation horizontale et les chambres à ventilation verticale (Figure 3). Pour ce qui est de l'extraction de l'air vicié, elles ne diffèrent pas des modèles à ventilation horizontale. Toutefois, afin de corriger le problème d'apport d'air de ce type de cabines, les fabricants y ont installé un système de compensation qui introduit l'air par un plénum situé sur la cabine, dans sa partie arrière, soit à l'extrémité opposée à l'extraction. D'après le guide de ventilation de la CSST (1998), cette amélioration par rapport aux modèles à ventilation horizontale rend ces équipements indépendants de la ventilation du reste de l'atelier et permet d'assurer une meilleure qualité de l'air dans la cabine.



**Figure 3. Cabine de peinture fermée à ventilation oblique**

Ce type de ventilation oblique crée deux zones à l'intérieur de la cabine. Dans la partie arrière, où s'effectue l'apport d'air, on observe un déplacement d'air descendant, éloignant les contaminants de la zone respiratoire du peintre. Par contre, dans la partie avant, à proximité de l'extraction, le déplacement d'air a repris la même trajectoire horizontale que dans les cabines possédant ce type de ventilation. Lorsque le peintre doit tourner autour du sujet, il se trouve à un moment donné face à l'arrivée d'air et dans l'atmosphère polluée puisque la paroi aspirante est derrière son dos. Le peintre se trouve donc alors exposé aux mêmes risques que dans les modèles à ventilation horizontale, c'est-à-dire, qu'il fait face au déplacement des contaminants qui se dirigent vers les conduits d'évacuation.



### **1-3-5 / Cabines à toit ouvert et aires de peinture**

Cette sorte de cabine est utilisée dans le cas où une cabine fermée n'est pas utilisable, par exemple pour les produits volumineux et lourds ou très encombrants nécessairement transportés par pont roulant. Elles sont équipées d'un dispositif d'aspiration depuis le sol.

#### **1-3-5-1 / Cabines à toit ouvert**

Elles ressemblent aux cabines fermées, mais leur plafond présente une ouverture plus ou moins grande pour laisser passer les subjectiles (outils, machines). Elles doivent permettre d'atteindre les mêmes objectifs de ventilation que les autres cabines.

D'après le Guide de ventilation de la CSST (1998) et le Guide pratique de ventilation de l'INRS (1987), un certain nombre de critères et de conditions sont nécessaires :

- Cloisons de hauteur suffisante en rapport avec les dimensions de la cabine et du subjectile ;
- Vitesse de l'air permettant au peintre de travailler dans une atmosphère non polluée ;
- Compensation de l'air extrait par une entrée d'air équivalente dans l'atelier.

#### **1-3-5-2 / Aires de peinture**

C'est une zone plane située au niveau du sol de l'atelier, reliée à une fosse équipée d'un système d'aspiration mécanique. La nécessité d'avoir une aspiration homogène sur toute la surface exige que la fosse contienne des dispositifs de répartition du flux d'air (Déflecteurs, matériaux diffusant poreux,...). Selon le Guide de ventilation de la

CSST (1998), de tels postes ne sont acceptables que pour des objets de faibles hauteurs et de grandes longueurs que le peintre peut peindre près du caillebotis.

L'aire de préparation (Prep-Area) est un système de ventilation à espace ouvert qui fait circuler l'air verticalement de son plafond soufflant vers son plancher. Ces installations ont été conçues pour des opérations de sablage et d'application d'apprêt. Elles offrent un débit variant généralement entre 170 m<sup>3</sup>/min et 340 m<sup>3</sup>/min. L'air qui y circule est évacué ou recirculé grâce à un volet qui peut être actionné selon le mode d'utilisation. Les aires de préparation sont dans certain cas munies d'un système de remplacement de l'air. Les filtres doivent être changés selon les spécifications prévues par les manufacturiers.

D'après le guide d'utilisation sécuritaire des isocyanates de l'IRSST (2002), il est suggéré de remplacer les filtres d'évacuation après deux semaines. Dès qu'on s'éloigne de la surface aspirante, la vitesse de l'air décroît assez rapidement. Certaines études de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (1988), montrent que la fosse aspirante est très sensible aux courants d'air. Sur une aire de peinture, il est nécessaire de placer le sujet à peindre le plus près possible de la surface aspirante et de telle façon que l'aérosol soit aspiré par le flux d'air.

Pour améliorer la ventilation au-dessus d'une aire de peinture, les fabricants ont installé :

- Une paroi verticale autour du sujet à peindre, qui reconstitue en quelque sorte une cabine de peinture ;
- Un soufflage d'air dirigé de façon à entraîner les produits de pollution vers l'ouverture aspirante sans les disperser dans tout l'atelier. La conception et le réglage d'une telle installation sont des opérations délicates qui doivent être

réalisées par un spécialiste. Pour assurer le bon fonctionnement de ce mode de ventilation, il faut que le débit d'extraction soit supérieur au débit de soufflage.

La présente étude mesure l'efficacité de ventilation de ces aires de préparation afin de savoir si les travailleurs sont exposés ou non lors de la pulvérisation, sachant que les trois aires de préparation à étudier ont des différents systèmes de fonctionnement.

#### **1-4 / Réglementation sur la ventilation industrielle**

Le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (2002), traite certains aspects de la ventilation industrielle. Ces aspects concernent notamment le captage à la source des émissions ponctuelles, les taux de ventilation mécanique requis dans un établissement selon sa classification, les contraintes relatives à la re-circulation après filtration de certains contaminants et les limites de concentration de contaminants chimiques permises.

Selon le Guide de ventilation de la CSST (1998) et le Règlement sur la santé et la sécurité du travail au Québec (2002), ce dernier spécifie que tout poste de travail doit être ventilé par des moyens mécaniques ou naturels afin de respecter les valeurs de concentration des contaminants chimiques. Il oblige également à capter à la source toutes les émissions provenant d'une source ponctuelle de contaminants à un poste de travail fixe.

Le même règlement souligne la nécessité de ventiler par des moyens mécaniques ou naturels et détermine les caractéristiques des systèmes de ventilation mécaniques. Selon le chapitre II du Guide de ventilation de la CSST (1998, page1), ces systèmes doivent :

- Être conçus selon les règles de l'art ;
- Comprendre des conduits servant uniquement au transport de l'air contaminé ;

- Comprendre des prises d'air situées de façon à éviter la réintroduction des contaminants ;
- Être pourvus de systèmes d'arrêt reliés au système d'alarme ;
- Être munis d'interrupteurs ;
- Être inspectés et réglés au moins une fois par année.

Toujours d'après le Règlement sur la santé et la sécurité du travail au Québec (2002), pour la ventilation locale ou un poste de travail fixe, en présence d'une source d'émission ponctuelle d'un contaminant, une ventilation d'extraction locale à la source s'impose. Le Code national du bâtiment exige que les contaminants soient captés à la source.

#### **1-4-1 / Normes NFPA-33 sur les aires de peinture « Prep-Station »**

Selon le Guide de ventilation de la CSST (1988) et la Gazette officielle du Québec (2001), les principales normes de NFPA-33 sur les aires de peinture au Québec sont :

- Pas de flammes nues ou d'étincelles à moins de 20 mètres des opérations de pulvérisation.

Il faut que l'aire de finition limitée comprenne :

- Système d'apport d'air de compensation dédié ;
- Rideaux ou parois non combustibles ou à combustibilité limitée ;
- Système mécanique dédié de filtration et d'évacuation ;
- Système d'extinction automatique ;
- Pas plus de 3,8 litres de produit pulvérisé par période de 8 heures ;
- Rideaux fermés entièrement pendant les opérations ;

- Une installation électrique conforme aux normes ;
- Pas d'autres opérations susceptibles de produire des étincelles dans les aires de finition limitées utilisées pour pulvérisation.

### **1-5 / L'efficacité de captage**

Selon Cornu et collaborateurs (1991), jusqu'à ces dernières années, le contrôle des performances des dispositifs d'aspiration était basé sur des mesures de vitesse de l'air et des prélèvements d'atmosphère dans les zones d'émission du polluant.

Une nouvelle notion a été introduite, c'est l'efficacité de captage qui permet une évaluation plus complète et plus précise du système de captage. Pour ce faire, la méthode par traçage est fréquemment utilisée à l'IRSST. Cette méthode permet de fixer certaines variables et d'établir des valeurs de référence.

#### **1-5-1 / Principe**

Selon la Norme Française enregistrée (1982), le principe de la méthode par traçage repose sur deux hypothèses qui doivent être vérifiées simultanément :

- Le transfert du traceur de son point d'émission à l'orifice de captage est identique à celui de captage du polluant ;
- Émettre un traceur simulant le comportement aérodynamique du polluant réel avec le débit de traceur ( $q_E$ ) ;

Cette technique consiste à utiliser un gaz traceur que l'on génère dans les conditions de vitesse, de débit et de direction les plus représentatives de la source polluante réelle.

La méthode de gaz traceur consiste à mesurer la concentration moyenne en gaz traceur dans le conduit de captage dans deux situations de génération. Dans un premier temps, le gaz est émis directement dans le dispositif de captage afin d'obtenir la concentration correspondant à une efficacité de 100 %. Dans un deuxième temps, le traceur est émis de façon à simuler au mieux l'émission du polluant. Le rapport des concentrations mesurées dans ces deux configurations donne l'efficacité de captage du dispositif vis-à-vis du polluant.

Les différences d'émission et de transfert apparaissent lorsque les caractéristiques physiques du traceur sont très éloignées de celles du polluant. Niemelä et collaborateurs (1992) ont montré l'absence de différence entre les valeurs de l'efficacité de captage mesuré au moyen de plusieurs gaz traceurs ayant des caractéristiques de diffusivité et de densité très différente sauf dans certaines conditions particulières (présence d'un courant d'air perturbateur, traceur non dilué) où des variations parfois significatives ont été relevées.

D'après Bémer et Muller (1987), l'étude théorique du transfert d'un aérosol vers un orifice de captage au moyen de modèles numériques ou par une simple approche faisant appel au temps de relaxation et à la vitesse de sédimentation des particules, a montré qu'il était quasi identique à celui d'un gaz lorsque les trois conditions suivantes sont vérifiées :

- Diamètre aérodynamique des particules inférieur à 30  $\mu\text{m}$  environ ;
- Particules émises sans vitesse relative initiale par rapport au gaz ;
- Temps de transfert court (captage direct).

Il est important de mentionner que toutes ces conditions sont respectées dans le cas présent.

### **1-5-2 / Expression simplifiée de l'efficacité de captage**

Selon le Comité Européen de Normalisation (1996) et l'INRS (1987), l'efficacité de captage exprimée en pourcentage est égale à :

$$\eta_c = q_c / q_E * 100 \quad (1)$$

Pour déterminer le débit de traceur ( $q_E$ ) on émet ce traceur à débit constant directement dans le conduit d'extraction et en mesurant la concentration moyenne de traceur dans une section du conduit ;

$$q_E = Q (C_2 - C_1) \quad (2)$$

Avec :

$Q$  : est le débit d'air moyen dans le conduit pendant la période de mesure de ( $q_E$ ) ;

$C_1$ : est la concentration ambiante moyenne du traceur avant les mesures (niveau résiduel) ;

$C_2$ : est la concentration moyenne du traceur dans le conduit (émission du traceur dans le conduit) ;

$q_c$ : Le débit de traceur capté par le système d'aspiration.

Le mesurage du débit de traceur ( $q_c$ ) est réalisé en émettant ce traceur à débit constant ( $q_E$ ) en un point ou une zone caractéristique de l'émission du polluant réel et en mesurant la concentration moyenne de traceur aux mêmes points dans le conduit :

$$q_c = Q'(C_3 - C'_1)$$

où :

$Q'$  : est le débit d'air moyen dans le conduit pendant la période de mesure de ( $q_c$ );

$C'_1$  : est la concentration moyenne ambiante du traceur après stabilisation du niveau résiduel;

$C_3$  : est la concentration moyenne du traceur dans le conduit (émission à un emplacement choisi).

L'efficacité de captage s'exprime en pourcentage comme suit :

$$\eta_c = q_c / q_E * 100 = Q' (C_3 - C'_1) / Q (C_2 - C_1) * 100$$

si le débit d'aspiration peut être considéré comme constant, alors  $Q = Q'$  et l'expression peut se simplifier :

$$\eta_c = (C_3 - C'_1) / (C_2 - C_1) * 100 \quad (3)$$

L'efficacité de captage est alors déterminée à partir des seules mesures de concentrations dans le conduit d'aspiration. Les prélèvements destinés aux mesures des concentrations dans le conduit sont réalisés après homogénéisation du traceur dans l'air.

Dans cette étude la notion de l'efficacité de captage a été utilisée pour évaluer les différents systèmes de ventilation des aires de préparation dans les ateliers du secteur de l'automobile. Sachant que, les anciennes études des systèmes de ventilation industrielles et plus précisément, les études d'évaluation de l'efficacité de confinement des cabines de peintures ont été basées sur des mesures de vitesse de l'air et des prélèvements des échantillons dans les zones d'émission du polluant et à la limite des mesures de débit d'évacuation du système de ventilation ont été effectuées dans certaines études. Cette ancienne technique d'évaluation permet d'évaluer l'efficacité de confinement des différents



systèmes de ventilation industrielles que ce soit des aires de préparation ou des chambres de peinture d'une façon incomplète et non précise.

### **1-5-3 / Paramètres de contrôle de l'efficacité de captage**

Dans cette partie, les paramètres de contrôle sur lesquels il est possible d'agir ont été traités pour simuler au mieux l'émission réelle du polluant et des paramètres qui influencent la mesure et caractérisent la situation lors de l'intervention.

Un des paramètres qui permet le contrôle de l'efficacité de captage est la nature du traceur. Le traceur peut être un gaz ou un aérosol.

D'après Niemelä et collaborateurs (1992), dans le cas d'un polluant gazeux, compte tenu de ce que le coefficient de diffusion turbulent d'un gaz mesuré sur site est beaucoup plus important que son coefficient de diffusion moléculaire, il est raisonnable de considérer que le comportement d'ensemble de tous les gaz, du point de vue des transferts globaux de masse, est considéré identique. D'après Hampl (1984), de nombreux traceurs peuvent être utilisés tels que des traceurs minéraux ou organiques, radioactifs ou non, mais il est nécessaire que le traceur utilisé satisfasse aux exigences suivantes ;

- Toxicité nulle ou très faible ;
- Spécifique et différent des polluants dans l'air ;
- Déchargé dans un modèle semblable au modèle d'origine de polluant ;
- Non-interférence avec les polluants présents dans le local ;
- Chimiquement stable ;
- Facile à mesurer.

Pour des raisons pratiques un traceur doit aussi rencontrer les deux conditions suivantes :

- Le traceur ne doit pas être nuisible pour les occupants ;
- Le traceur doit être disponible dans le commerce et économique.

Comme désigné par Regnier et collaborateurs (1986) et Niemela et collaborateurs (1989), le remplacement de vrai polluant avec un gaz de traceur fait appel, au cas par cas, à un développement d'une technique pour émettre le traceur. Les données sur l'efficacité de captage d'évacuation locale sont valables pour des bâtiments non industriels (Niemela et collaborateurs, 1992 ; Breum, 1988) et pour des bâtiments industriels (Vavasseur et collaborateurs, 1986).

Les gaz habituellement utilisés sont les suivants : He, SF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>. L'efficacité de captage dépendant de la masse volumique du traceur, on s'attachera à vérifier que les conditions d'émission se rapprochent bien de celles de l'émission réelle. Généralement, le gaz doit être dilué avant d'être émis.

Dans le cas d'un polluant sous forme d'aérosol, sur la base de considérations identiques sur les coefficients de diffusion, en se basant sur une étude publiée par l'INRS (1996), les aérosols fins peuvent être simulés par des gaz traceurs. Au-delà de trois à quatre micromètres (µm), on note une différence dans le transfert d'autant plus importante que la taille des particules est plus importante. La simulation d'un aérosol par un autre aérosol, plus facile à caractériser ou à mesurer, est une technique également utilisable bien que plus délicate à mettre en œuvre, surtout en milieu industriel.

Dans cette étude, l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) est utilisé comme gaz traceur ; il a été choisi parce qu'il a des caractéristiques désirables en termes de détectabilité, sécurité et

coût. L'efficacité de captage dépend aussi de la forme et de la position de l'émetteur. Il faut que la forme de l'émetteur se rapproche au mieux de la source réelle de polluant. Ainsi, l'efficacité de captage est relativement sensible aux caractéristiques aérauliques de l'émission (vitesse, débit). Dans les conditions expérimentales de cette étude, l'hexafluorure de soufre a la même vitesse et le même débit que la peinture à base d'isocyanate.

#### **1-6 / Les différentes méthodes de gaz traceur**

La connaissance des débits d'émission est fondamentale lors de la phase de conception des installations de ventilation, notamment pour le choix des solutions et le dimensionnement des composantes. Elle est indispensable à une approche prévisionnelle permettant de déterminer, par exemple, la distribution spatiale des concentrations de polluant dans un local ou à proximité d'une source.

La méthode d'évaluation la plus utilisée, est la méthode de gaz de traceur. En fait trois procédés fondamentaux sont utilisés :

- Deux procédés connus comme méthode par injection à débit constant et méthode par intégration (injection instantanée), sont fondés sur le principe de la dilution : on injecte un traceur et on détermine le rapport de dilution du traceur dans le gaz de la conduite, cette dilution étant proportionnelle au débit.
- Le troisième procédé est une méthode de mesurage du temps de transit de l'écoulement (méthode d'Allen) : le traceur est injecté dans la conduite et on mesure

le temps mis par le traceur pour parcourir une longueur connue entre deux sections dans lesquelles nous déterminons son passage.

Les rapports de Nordtest illustrent en détail des essais par la méthode de transit pour mesurer l'âge moyen d'air des locaux (Sandberg, 1986), et de pièce (Sandberg, 1983). La méthode d'intégration (injection instantanée) a été employée par Niemela et collaborateurs (1986), pour la caractérisation de débit dans des grands bâtiments. La méthode d'injection à débit constant a été appliquée par Breum et collaborateurs (1988), Fisk et collaborateurs (1988) et Fisk et collaborateurs (1990).

Niemela (1989), Sutcliffe et Waters (1990) et Breum (1992) ont constaté que les trois méthodes suivantes de gaz traceur étaient fiables pour évaluer l'âge moyen de l'air. De façon classique, l'âge de l'air dans un local est déterminé soit à partir d'une réponse impulsionnelle, soit à partir d'une réponse indicielle. L'application de ces deux modèles théoriques présente un certain nombre de difficultés, notamment celle liée à la durée de l'injection qui doit être infiniment petite ou infiniment longue. La méthode de transit a prouvé qu'elle peut être utile dans des petites pièces où les conditions parfaites de mélange pourraient être rencontrées dans l'expérience. La méthode d'injection à débit constant était une approche commode pour simuler l'émission d'un vrai polluant.

Lefevre et collaborateurs (1996) ont effectué des mesures de concentrations en polluants dans quatre entreprises autour des creusets de galvanisation à chaud, en utilisant la technique de mesurage par traçage à l'hélium pour évaluer la performance de l'efficacité de captage des divers dispositifs implantés sur les creusets. L'INRS (1996), a entrepris une étude expérimentale visant à déterminer les performances de captage de fentes d'aspiration

latérales des cuves de traitement de surface. Des maquettes à l'échelle ont été testées au sein d'une enceinte aéraulique simulant un courant d'air d'intensité et de direction maîtrisée avec un débit d'extraction couvrant le domaine habituellement recommandé. L'étude a montré la pertinence et l'intérêt de la technique de traçage pour une évaluation directe des performances des systèmes de ventilation.

Regnier et collaborateurs (1996), ont appliqué une méthode hybride, consistant à injecter une quantité de traceur sur un temps donné, ce qui permet de cumuler les avantages de chacune des deux méthodes. La formule fournie pour le calcul des âges est exacte quel que soit le type d'écoulement. Elle est dérivée des formules établies pour une réponse impulsionnelle où une correction est apportée pour prendre en compte la fonction de génération du traceur.

Bémer et collaborateurs (1999), ont utilisé la méthode par traçage qui consiste à suivre au moyen d'un gaz traceur un polluant gazeux émis par une source à débit constant afin d'en déterminer le débit massique. L'étude démontre la validité de la méthode par traçage pour la détermination du débit d'émission d'une source polluante constituée par un bain de solvant placé à l'air libre. Des limitations ont cependant pu être mises en évidence lorsque cette source se trouvait placée en air très calme (vitesse de l'air au-dessus du bain inférieur à 10 cm/s environ). Mais cette situation n'est certainement pas la plus commune en milieu industriel où les vitesses d'air moyennes sont largement supérieures.

Il est envisagé d'étendre cette méthode au cas des sources de polluant particulières très fréquentes en milieux industriels (poussières de bois, brouillards d'huile, fumées de soudage).

Au cours de cette étude, la méthode de traçage par injection à débit constant a été utilisée pour évaluer l'efficacité de confinement des différents systèmes de ventilation des aires de préparation.

### **1-7 / Techniques de prélèvement des échantillons et d'émission de gaz traceur**

Harrje et collaborateurs (1982) et Persily et Linteris (1983), ont utilisé des bouteilles de polyéthylène flexible pour le prélèvement d'échantillons d'air étiqueté avec  $\text{SF}_6$ . Pour émettre une quantité initiale de  $\text{SF}_6$ , ils ont utilisé une seringue pour avoir une injection instantanée d'une faible quantité de gaz traceur. La méthode de seringue ne peut pas être utilisée pour une longue durée. La méthode de pompe à seringue a été utilisée dans le laboratoire de l'IRSST pour faire des tests d'interférence sur l'analyseur multi-gaz (B&K), utilisé pour la mesure du  $\text{SF}_6$ .

Dietz et collaborateurs (1986), ont utilisé des tubes capillaires d'adsorption pour le prélèvement d'échantillons témoins (longue période d'échantillonnage). Mais pour un prélèvement d'échantillons à courte période, ils ont employé un échantillonneur de multitube programmable adapté avec une petite pompe. Cette technique a permis d'étudier la variation de la concentration de gaz traceur en fonction du temps. Dans cette étude, les modules automatisés de prélèvement ont été utilisés pour échantillonner l'isocyanate dans les aires de préparation. Cette technique permet de déterminer la dispersion de l'isocyanate dans le milieu et la variation de sa concentration en fonction du temps.

Plusieurs méthodes ont été décrites dans la littérature pour avoir un taux constant de gaz traceur. Ces méthodes incluent une sortie d'un cylindre de gaz avec une valve

d'aiguille (Breum, 1987), une valve de solénoïde (Riffat et collaborateurs, 1987) ou un contrôleur de débitmètre massique (Riffat et Holmes, 1990). L'émission continue contrôlée par la concentration de gaz de traceur exige l'utilisation d'instruments automatisés pour analyser la concentration de traceur, et injecter en même temps une quantité appropriée de traceur pour maintenir la concentration au niveau exigé.

### **1-8 / Problématique**

Depuis le début de l'automne 1998, un comité provincial sur les isocyanates a été mis sur pied par la CSST et regroupe des intervenants de la CSST, des RR et CLSC, de l'ASP automobiles et de l'IRSST. Le but de ce comité est de documenter les risques d'exposition aux isocyanates dans l'ensemble des situations d'exposition professionnelle et d'uniformiser les protocoles d'intervention, de dépistage et de diagnostic de l'asthme.

Cependant, dans certains ateliers de réparation de carrosserie, une nouvelle technologie, apparue récemment, attire l'attention et soulève des inquiétudes : l'utilisation d'une aire de préparation ventilée "Prep-Station" pour des travaux d'application de peinture hors cabine. Actuellement, les performances de ce procédé n'ont pas été documentées quant aux niveaux potentiels d'exposition et à l'efficacité d'élimination des contaminants dans l'air. Il en est de même pour l'utilisation de pistolets à haut volume et basse pression (HVLP). Cette inquiétude nous conduit à poser certaines questions, telles :

- Est-ce que les différents systèmes de ventilation des aires de préparation utilisés lors de la pulvérisation de revêtement aux isocyanates appliqué par le pistolet HVLP sont efficaces ?

- Quelles sont les méthodes à utiliser pour évaluer l'efficacité des systèmes de ventilation des aires de préparation?
- Peut-on utiliser les aires de préparation tout en respectant les valeurs limites d'exposition aux isocyanates lors de l'application de la peinture ?
- Quelle est la méthode à utiliser pour évaluer l'exposition des peintres et des travailleurs situés dans l'environnement immédiat de la station de peinture ?

### **1-9 / But de l'étude**

En raison du nombre de cas d'asthme, le secteur de l'application de peinture automobile constitue une priorité d'intervention. En collaboration avec l'ASP automobile et la CSST, l'IRSST a proposé une étude afin d'évaluer les niveaux d'exposition des travailleurs aux isocyanates et une mesure de performance relative de ces aires de préparation a été effectuée. Pour obtenir une vue d'ensemble sur les niveaux d'exposition aux isocyanates dans les ateliers du secteur automobile, il est important de documenter l'ensemble des postes de travail, c'est-à-dire le peintre et à l'extérieur des aires de préparation.

Les anciennes méthodes de contrôle des performances des systèmes de ventilation étaient basées sur des mesures de vitesse de l'air, la direction de mouvement de l'air, l'homogénéité de la répartition de l'air et les prélèvements des échantillons dans les zones d'émission du polluant.

Après une recherche dans la littérature, deux méthodes sont disponibles et peuvent être utilisées pour évaluer l'efficacité d'un système de ventilation : la méthode par traçage et la méthode d'échantillonnage de l'IRSST pour les isocyanates (Iso-Chek<sup>R</sup>).



Dans cette étude, la méthode par traçage a été utilisée pour évaluer l'efficacité des systèmes de ventilation des aires de préparation à confiner les contaminants à l'intérieur de la zone encloisonnée. Le SF<sub>6</sub> est utilisé comme gaz traceur, il est considéré comme un des meilleurs gaz traceurs pour vérifier les conditions exigées. La méthode de gaz traceur est une nouvelle technique qui nous permet d'utiliser des appareils de détection et de mesure plus sensibles et plus précis. Dans cette étude, le système de prélèvement automatisé pour l'échantillonnage du SF<sub>6</sub> développé à l'IRSST a été utilisé.

La méthode d'échantillonnage de l'IRSST pour les isocyanates (Iso-Chek<sup>R</sup>) est utilisée pour déterminer les concentrations des isocyanates à l'intérieur et à proximité des aires de préparation. Le système de prélèvement des isocyanates (Iso-Chek<sup>R</sup>), qui a été développé à l'IRSST, permet de doser l'isocyanate avec une grande précision et de les caractériser grâce à des méthodes analytiques avant-gardistes.

La méthode par traçage est caractérisée par sa sensibilité au phénomène de la dispersion des contaminants chimiques. La méthode d'échantillonnage pour les isocyanates (Iso-Chek<sup>R</sup>) est caractérisée par sa spécificité. Ces deux méthodes d'échantillonnages de gaz traceur (SF<sub>6</sub>) et des isocyanates (Iso-Chek<sup>R</sup>) sont considérées comme deux méthodes complémentaires.

Afin d'évaluer l'efficacité des systèmes de ventilation des aires de préparation et de formuler les limitations de l'utilisation de ceux-ci, la méthode de gaz traceur et la méthode d'échantillonnage pour l'isocyanate (Iso-Chek<sup>R</sup>) ont été utilisées. Pour réaliser cette étude, une méthodologie a été fixée. Le chapitre II présente la méthodologie et les étapes essentielles qui ont été suivies pour mettre en évidence l'application de ces techniques.

## CHAPITRE II

### MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

#### **2-1 / Protocole expérimental**

Au cours de cette étude, une évaluation de l'exposition potentielle des travailleurs aux isocyanates et aux solvants de peinture est effectuée au voisinage des différentes aires de préparation. Ainsi, l'efficacité de confinement de chaque aire de préparation est évaluée. La technique de traçage et la méthode d'échantillonnage de l'IRSST pour les isocyanates (Iso-Chek<sup>R</sup>) ont été utilisées afin d'évaluer l'efficacité des systèmes de ventilation des aires de préparation. Au cours de cette étude, l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) est utilisé comme traceur. L'hexafluorure de soufre à une concentration connue et un débit constant est introduit dans la ligne d'air comprimé alimentant le pistolet de pulvérisation. Des prélèvements de gaz traceur sont effectués au voisinage des aires de préparation à l'aide de modules automatisés de prélèvement. L'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) est injecté à l'état pur dans l'air comprimé qui alimente le pistolet de pulvérisation. De plus, un échantillonnage personnel des isocyanates a été effectué sur le peintre lors de l'application de la peinture. À cet égard, les méthodes d'échantillonnage de l'IRSST ont été utilisées pour évaluer l'exposition des travailleurs aux isocyanates et aux solvants de peinture : ces méthodes sont décrites à la suite de ce chapitre.

La technique d'application HVLP a été évaluée. Lors de la simulation de peinture, un certain nombre de paramètres ont été fixés et les conditions d'application ont été contrôlées. Avant de commencer l'échantillonnage, les filtres sont remplacés, la différence entre les pressions en amont et en aval du filtre a été mesurée et le rapport d'équilibrage récent est obtenu (moins d'une semaine) afin de s'assurer que les systèmes de ventilation opèrent selon les spécifications du fabricant. Des mesures ont été effectuées dans la cheminée à l'aide d'un anémomètre pour déterminer la vitesse d'évacuation d'air et calculer ainsi le débit d'évacuation de toutes les aires de préparation à l'aide de l'équation suivante:

$$Q = A \times V \quad (4)$$

Avec :

A : Surface du conduit d'évacuation ( $m^2$ ) ;

V : Vitesse (m/sec) ;

Q : Débit d'évacuation ( $m^3/sec$ ).

Compte tenu de la présence des isocyanates et des solvants dans les peintures, les personnes présentes lors des essais sont protégées par un masque.

## **2-2/ Méthodologie et instrumentation**

### **2-2-1/ Évaluation environnementale des différentes aires de préparation**

Dans cette partie, les plans des établissements et la localisation des équipements sont présentés et étudiés. Ainsi, les différents paramètres de ventilation de chacune des aires de préparation ont été documentés.

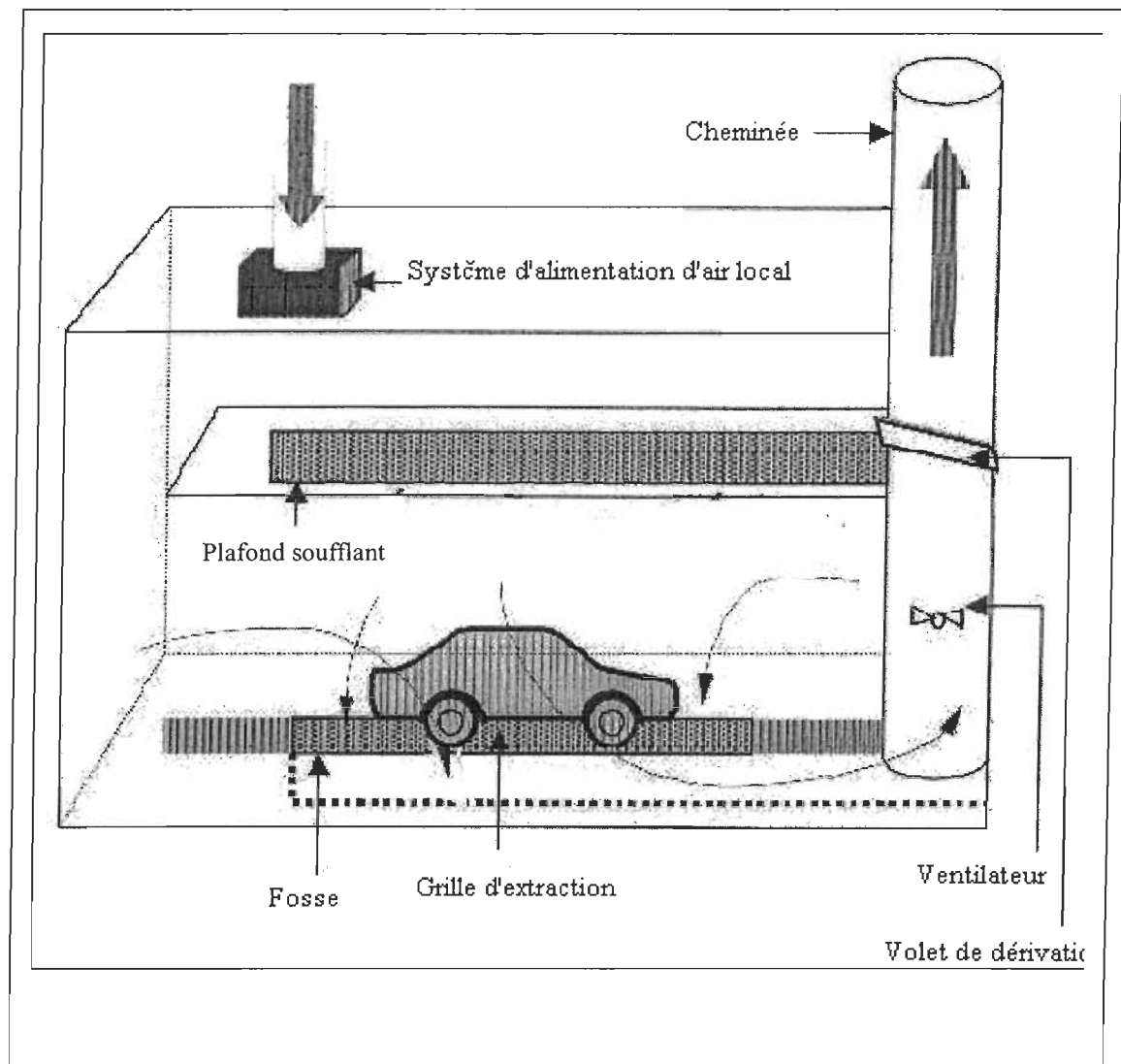
Au cours de cette étude, les trois types d'aires de préparation à étudier sont ceux utilisés au Québec dans les ateliers de carrosserie. Dès le début de cette étude, suite aux informations recueillies par la CSST et l'IRSST, les trois types d'aires de préparation ont été sélectionnés par la ventilation qu'elles procurent : oblique, système d'aspiration au plancher et semi-oblique.

#### **2-2-1-1/ Aire de préparation (A) : « Concept-Prep »**

La première aire de préparation à étudier consistait en une unité d'aire de préparation de type « Concept-Prep », distribuée par Thermo-Concept V-H Inc, et utilisée par une école de formation. L'aire de préparation « Concept-Prep » a un système d'aspiration au plancher (fosse) d'une longueur de 4,8 m avec une largeur et une profondeur de 0,4 m (voir Figure 4). Une unité de chauffage avec brûleur en veine d'air (à feu direct au gaz naturel) est installée dans le local. L'air circulant dans l'aire de préparation provient de l'atelier où celle-ci est située. L'aire de préparation est munie d'un ventilateur centrifuge, son débit d'évacuation est de 340 m<sup>3</sup>/min. Son système de ventilation fonctionne suivant deux modes : soit le mode d'évacuation (100 %), soit le mode de recirculation (100%), selon la nature du travail. L'aire de préparation est munie d'un plafond soufflant d'une longueur de 4,8 m et d'une largeur de 1,8 m, le plafond soufflant fonctionne seulement sous le mode sablage. Ce type d'aire de préparation est équipé d'un rideau d'isolement conforme à la norme NFPA-701. Le système de filtration comprenant trois étapes de filtration : un filtre au plancher de type « paint-arrestor », un filtre de poche de type DP2-40 (air guard) en aval du ventilateur et, au plafond, un diffuseur

à filtre de haut rendement (99,99 %) pour la qualité du fini. Ce type d'aire de préparation est muni d'un panneau de contrôle et d'un conduit d'évacuation de 0,66 m de diamètre.

Cette aire de préparation a été inspectée avant de commencer l'échantillonnage, afin de vérifier la spécification du système de ventilation et le rapport d'équilibrage. Les résultats de l'inspection seront présentés dans le chapitre III. Selon un test de fumigène qualitatif, il y avait une recirculation d'une quantité de fumée lors du fonctionnement de l'aire de préparation sous mode d'évacuation. Cette recirculation est due à une étanchéité partielle du volet du système de ventilation de l'aire de préparation. Avant de recommencer nos tests, la réparation de ce volet a été exigée, mais même après la réparation du système nous soupçonnons qu'il y a toujours une faible recirculation d'air contaminé. Un changement de tous les filtres a été exigé afin de tester l'aire de préparation dans les conditions les plus proches des conditions idéales.



**Figure 4. Croquis du système d'aspiration au plancher avec compensation d'air dans le local (A)**

**2-2-1-2/ Aire de finition limitée double (B) : « Ultra Universal Workstations »**

L'aire de préparation du modèle « Ultra Universal Workstations » est utilisée par plusieurs compagnies au Québec. C'est une aire de finition limitée double avec un système de ventilation oblique (voir Figure 5). Selon la fiche signalétique du manufacturier, le débit

d'extraction était égal à  $340 \text{ m}^3/\text{min}$  pour chaque aire de finition. Cette aire de finition double est munie d'un rideau conforme à la norme NFPA 701. Cette aire de préparation est munie d'un système de compensation d'air avec un système de chauffage intégré. Les deux aires de préparation sont séparées par un rideau. Les deux plafonds soufflants ont chacun une dimension respective de 6,2 m et de 7,3 m; ils sont équipés par des filtres dont le rendement est de 99,9 %. Les grilles d'extraction sont équipées de pré-filtres spécialement pour les gouttelettes de peinture et la poussière; le rendement est de 99 %. En amont du ventilateur on retrouve des filtres à poche ayant un rendement de 87 %. De plus, le local de cette aire de préparation est équipé avec un système de ventilation qui se déclenche dès que le système détecte la présence de monoxyde de carbone. La fermeture du système de ventilation du local était assurée avant de commencer l'échantillonnage, parce que ce système peut déséquilibrer le système de ventilation de l'aire de préparation lors de son fonctionnement.

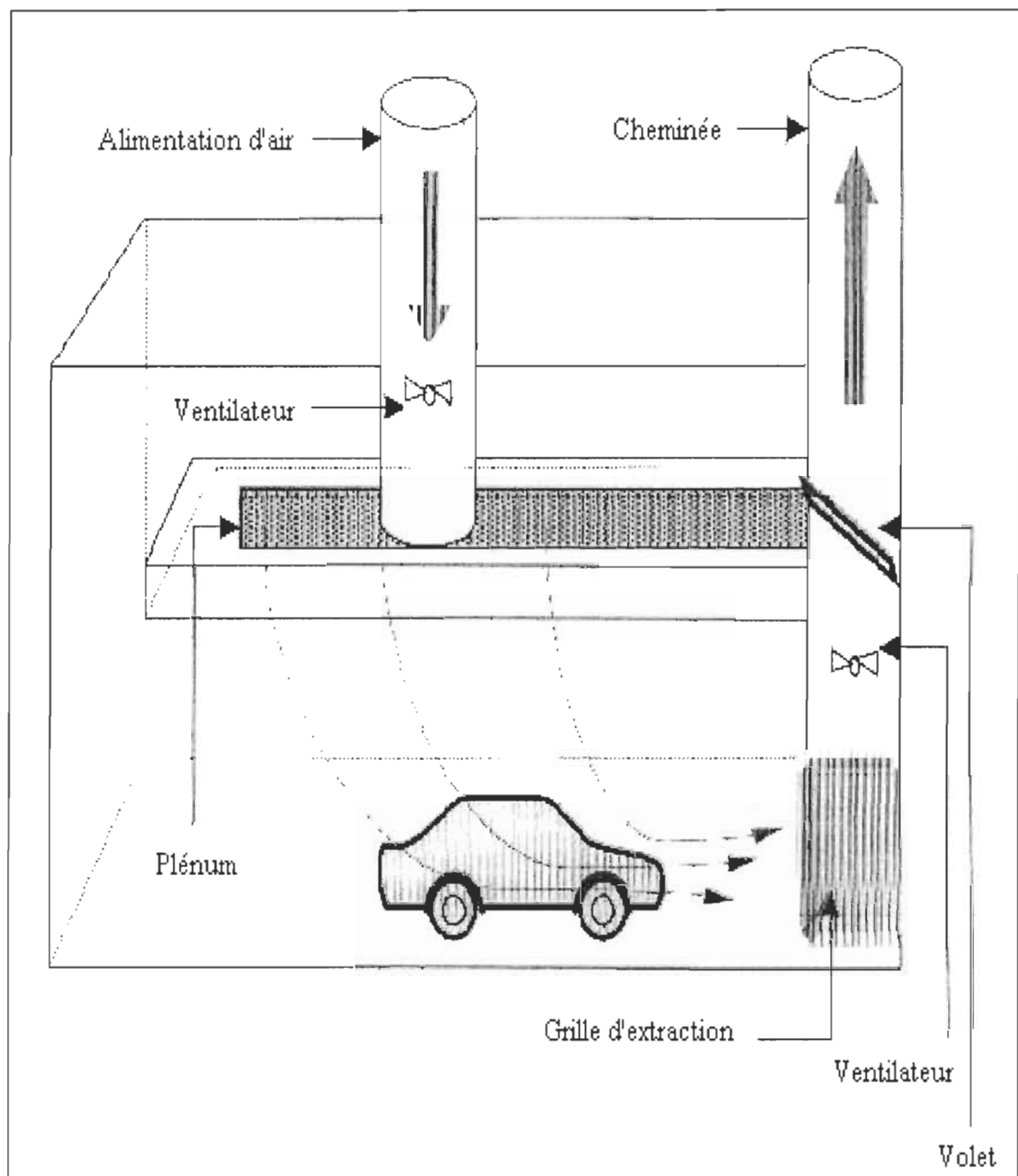
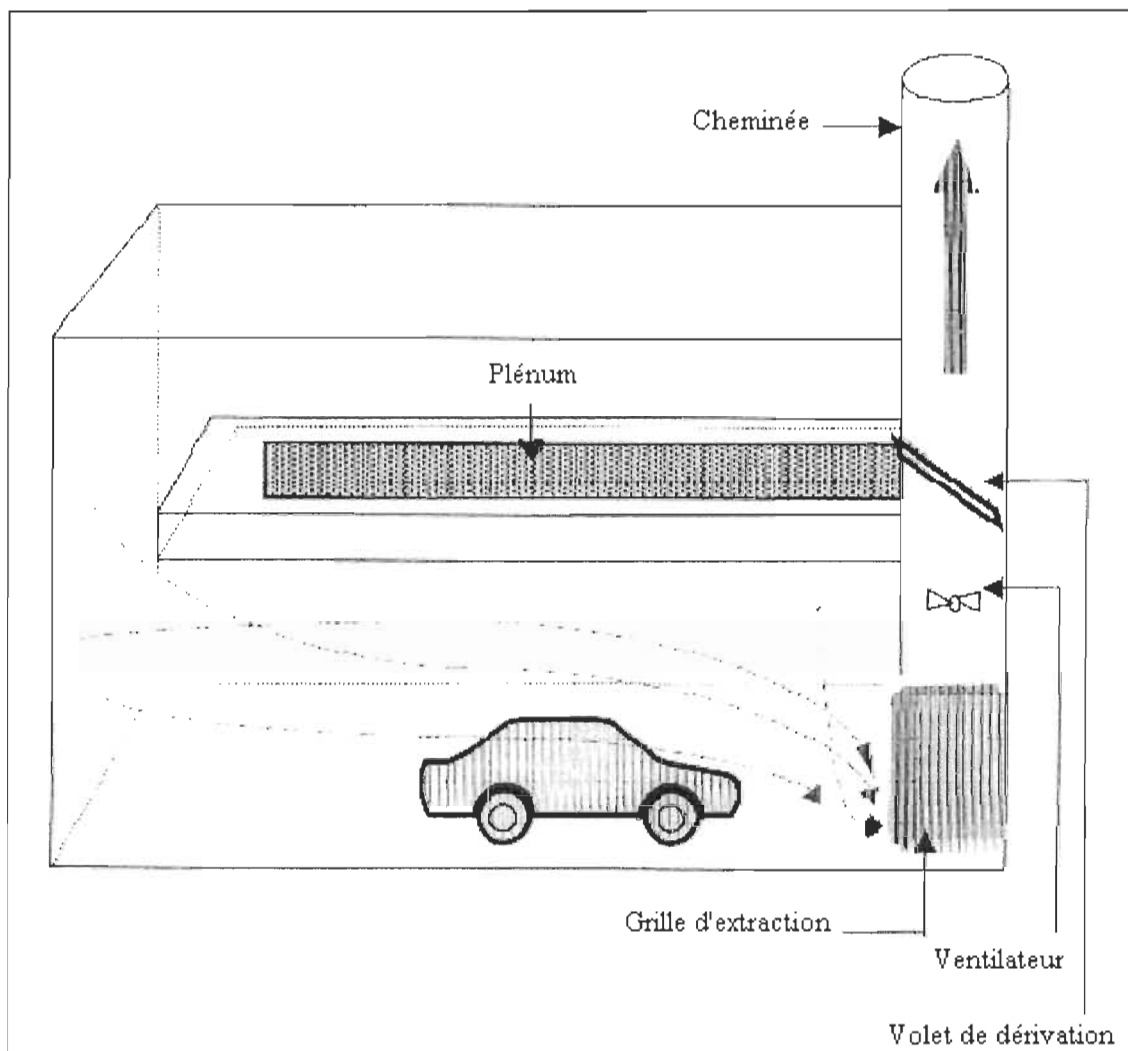


Figure 5. Croquis du système de ventilation oblique (B)



### **2-2-1-3/Aire de ponçage à trois postes de travaux (C) : « Multi-Prep »**

L'aire de préparation du modèle «Multi-Prep» est utilisée partout au Québec par les concessionnaires d'automobiles. Ce type d'aire de préparation est distribué par la compagnie Grand Prix Import. Une aire de préparation à trois baies «Multi-Prep 3» a été étudiée, son système de ventilation est semi-oblique (voir Figure 6). Cette aire de préparation est munie d'un ventilateur d'évacuation de capacité de 283 m<sup>3</sup>/min. Aucune unité de compensation d'air n'est prévue pour ce système de ventilation. Pour ce type d'aire de préparation, les trois postes de travail sont séparés par un rideau. Le plafond soufflant unique pour les trois postes de travail a une longueur de 6 m et une largeur de 1,5 m. Ce plafond soufflant fonctionne seulement sous le mode sablage ou ponçage. Cette aire de préparation est munie d'un système de filtration comprenant trois étapes de filtration sous mode pistelage et deux étapes seulement sous mode sablage, ce système de ventilation peut être contrôlé manuellement ou à l'aide d'une minuterie. Les trois grilles d'extraction ont une longueur de 1,82 m et de largeur de 0,6 m chacune.



**Figure 6. Croquis du système de ventilation semi oblique (C)**

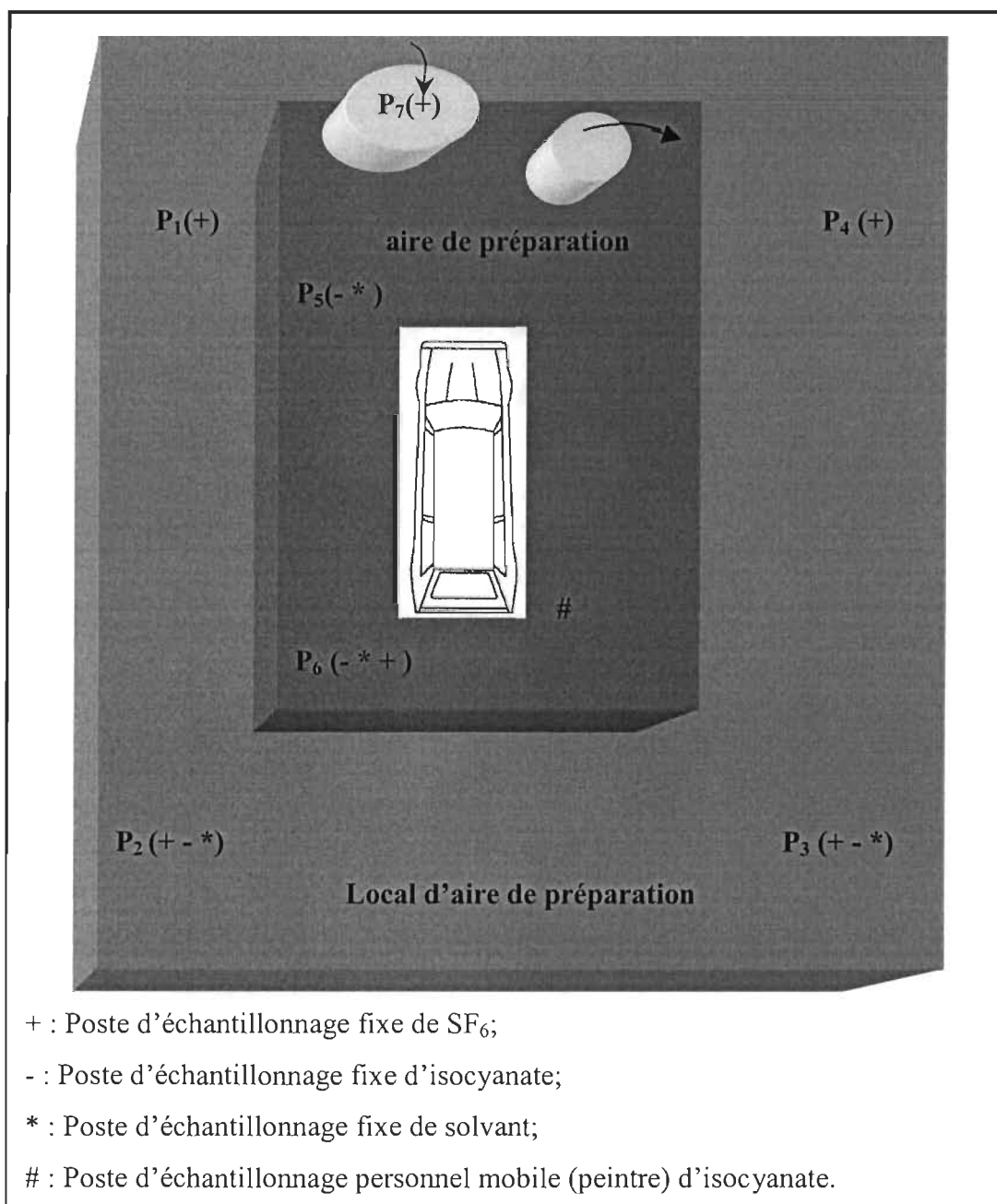
### **2-2-2/ Sites d'échantillonnage**

Cette partie de l'étude, présente le choix et la description des sites d'échantillonnage. La localisation des points d'échantillonnage du gaz traceur, des isocyanates et des solvants de peinture a été respectée pour les trois différentes aires de préparation.

Pour l'échantillonnage du gaz traceur ( $\text{SF}_6$ ), six postes d'échantillonnage ont été fixés: soit quatre points d'échantillonnage fixes au voisinage de l'aire de préparation, un point d'échantillonnage fixe à l'intérieur de l'aire de préparation et un point d'échantillonnage fixe sur le toit de l'aire de préparation près de l'unité de compensation d'air neuf (voir Figure 7). De plus, les concentrations du gaz traceur ( $\text{SF}_6$ ) dans la cheminée du ventilateur de l'aire de préparation ont été mesurées en utilisant l'analyseur multi-gaz (B&K). L'application d'une couche de peinture durait entre 4 et 9 minutes; l'application de trois ou quatre couches de peinture consécutives a été nécessaire pour obtenir la durée d'échantillonnage requis.

En ce qui concerne l'échantillonnage des isocyanates et des solvants de peinture, deux points d'échantillonnage à l'intérieur et deux autres à l'extérieur ont été fixés pour chacun (voir Figure 7). Ainsi, quatre échantillons ont été pris à chaque test dans les trois aires de préparation. Pour les isocyanates, un cinquième échantillon a été fait en zone respiratoire du peintre afin d'en évaluer l'exposition potentielle si celui-ci ne portait aucune protection respiratoire.

L'échantillonnage a été fait lors de l'application de la peinture sur un véhicule. Au cours des échantillonnages dans les différentes aires de préparation, toutes les portes et les fenêtres du local ont été fermées.



**Figure 7 : Postes d'échantillonnages dans les aires de préparation**

### 2-2-3/ Description des paramètres fixes

Lors de l'évaluation de l'efficacité de confinement du système de ventilation des aires de préparations, un certain nombre de paramètres ont été fixes.

Les paramètres fixes étaient :

- Type de peinture (produit identique pour toutes les simulations, même produit, même mélange) : La sélection des produits est effectuée en fonction de leur teneur en isocyanates et de la part du marché qu'ils représentent. La peinture appliquée était de l'acrylique uréthane utilisant un activateur à base d'isocyanate ajouté à la peinture juste avant l'application. La proportion d'isocyanates dans le activateur étant invariable, une analyse de la composition des peintures a été faite dans le laboratoire de IRSST.
- Quantité de peinture appliquée (la simulation représente le pire des cas réalistes, soit la peinture d'une surface représentant une auto au complet). Le volume de peinture appliqué a été mesuré par différence entre le volume mélangé et le volume de peinture restant après l'application. Le volume de peinture ciblé se situe entre 3 et 4 litres.
- Surface peinte : la surface peinte est, en fait, un véhicule de dimension moyenne.
- Toutes les aires de préparation sont munies d'un rideau amovible servant à limiter la propagation des émissions.
- Lors de la simulation, les conditions de ventilation hivernales s'appliquaient (portes de l'atelier fermées).
- La pression du pistolet HVLP se situait entre 55 KPa et 69 KPa.

#### **2-2-4 / Description des paramètres variables**

Au cours de cette étude, les paramètres variables ont été limités. En fait, il y a plusieurs paramètres expérimentaux que nous ne pouvons pas contrôler, en l'occurrence les paramètres variables qui sont :

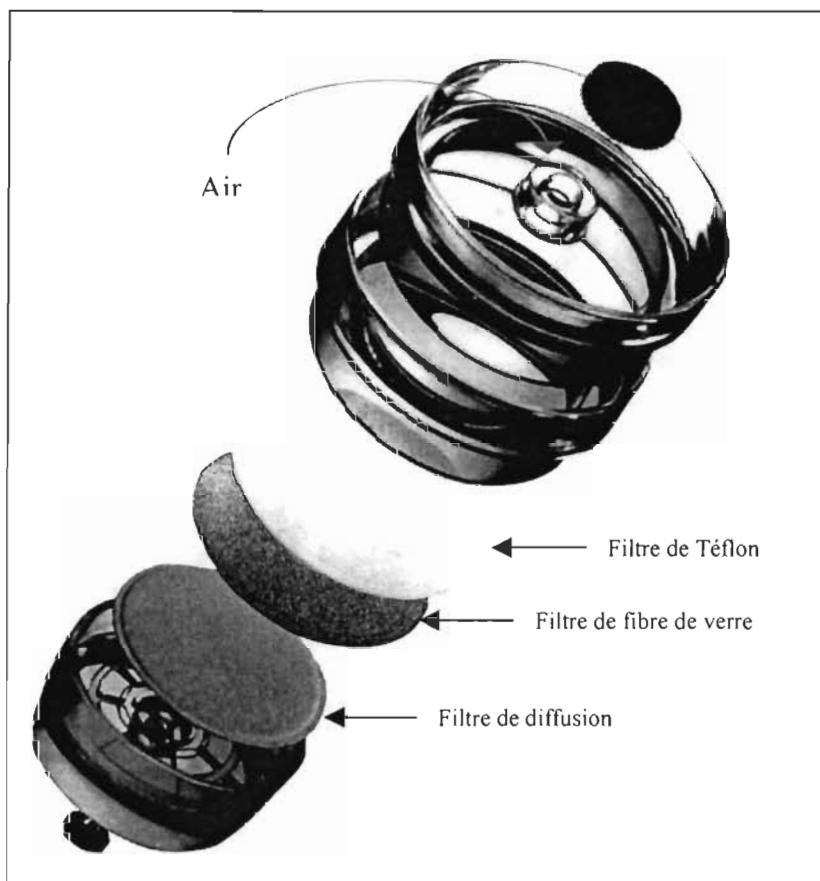
- La sélection des établissements pour les simulations (les aires de préparation dont le système de ventilation des cabines est vertical ou oblique).
- Les aires de préparation avec différentes configurations de grilles d'aspiration.

#### **2-2-5/ Échantillonnage et analyse d'isocyanate**

Les isocyanates se trouvent sous formes de particules et de gaz dans l'environnement de travail. Les méthodes d'échantillonnage de l'IRSST # 224 et # 234 (ISO-CHEK<sup>®</sup>) ont été utilisées pour échantillonner les isocyanates dans les aires de préparation. Les isocyanates ont été recueillis sur des filtre doubles insérés dans des cassettes et reliés à des pompes fonctionnant à 1 L/min. Le premier filtre en téflon retenait les isocyanates particulés alors que le second en fibre de verre imprégné de N-méthylaminométhyl-9 anthracène captait les isocyanates gazeux (Figure 8).

Immédiatement après l'échantillonnage, le filtre de téflon est prélevé avec une pince (côté face) et est déposé dans une jarre contenant cinq millilitres (ml) d'une solution de 1-(2-méthoxyphényl) piperazine (MOPIP) dans le toluène. La jarre doit porter le même numéro que la cassette d'échantillonnage, la cassette et la jarre étant retournées au laboratoire. Les échantillons ont été conservés à 4 °C, avant et après échantillonnage.

Pour déterminer la concentration d'isocyanates des échantillons d'air prélevés aux différents postes fixés à l'intérieur et à l'extérieur de l'aire de préparation, une chromatographie liquide à haute performance avec deux détecteurs en série : Ultraviolet et fluorescence est utilisée.



**Figure 8 : Système d'échantillonnage pour les isocyanates**

### **2-2-6 / Échantillonnage et analyse des solvants**

Les peintures utilisées dans tous les tests, dans les différentes aires de préparation, étaient des peintures uréthanes 2K-1125S. Les revêtements de type uréthane sont formés d'une base contenant un polymère hydroxylé et d'un catalyseur comprenant le polyisocyanate mélangé à des solvants anhydres. Quelques minutes avant l'application de peinture, les pigments et le catalyseur sont mélangés dans un diluant auxquels sont ajoutés, en faibles proportions des additifs.

Le catalyseur et le diluant de peinture étaient essentiellement composés de butyl acétate, acétate d'éthyle, acétate de butyle, éthylbenzene, xylène, cumene, 1,2,4-triméthyl benzène et d'hydrocarbures aromatiques en différentes proportions. Lors de l'application de la peinture, la méthode d'échantillonnage de l'IRSST pour les solvants #139-2 est utilisée. Cette méthode est basée sur l'utilisation d'une pompe d'échantillonnage personnelle avec un débit de 0,2 l/min, reliée à un tube de charbon actif # SKC ST 226-01 2120. De même, un essai d'échantillonnage quantitatif, c'est-à-dire jusqu'à la saturation du tube de charbon actif a été effectué à l'intérieur de l'aire de préparation.

Au laboratoire de l'IRSST, les échantillons qualitatifs des solvants ont été analysés par chromatographie en phase gazeuse couplée à une spectrométrie de masse de marque Finnigan Magnum.



### **2-3 / Méthode d'évaluation des systèmes de ventilation des aires de préparation**

L'évaluation du confinement des émissions à l'intérieur de la zone de pulvérisation des aires de préparation a été réalisée par la méthode de gaz traceur, en utilisant l'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ) comme gaz traceur. Il est choisi parce qu'il a les caractéristiques recherchées en termes de sensibilité analytique, sécurité et coût. Cette approche permet de déterminer si le système de ventilation des aires de préparation évaluées est capable de confiner le traceur généré à l'intérieur de la zone d'application de la peinture. En établissant le rapport entre les concentrations de traceur, mesurées dans la zone de pulvérisation, et celles mesurées dans la zone adjacente, on pourra déterminer un facteur de protection en fonction du type du système de ventilation des aires de préparation utilisé.

D'après Yu-Mei et Michael (2000), les brouillards de peinture proviennent principalement de l'effet de rebondissement des particules qui n'adhèrent pas à la surface au moment de la pulvérisation. Or, les particules de petites dimensions qui sont pulvérisées sont animées d'une énergie cinétique trop basse pour résister à la poussée de direction opposée des particules qui rebondissent. Ces particules sont donc entraînées dans la zone de travail par des écoulements d'air qui sont généralement turbulents.

L'utilisation de la technique de traçage à l'aide d'un gaz pour simuler la dispersion des brouillards de peinture est possible puisque les conditions d'applicabilité de cette technique suggérée par Bémer et collaborateurs (1998) sont rencontrées ; c'est-à-dire que les particules ont un diamètre aérodynamique inférieur à  $30 \mu\text{m}$ , les particules sont émises sans vitesse relative par rapport au gaz traceur et les temps de transfert sont relativement courts.

La méthode de traçage utilisée consiste à introduire un gaz traceur ( $\text{SF}_6$ ) à un débit et une concentration connue dans le réseau d'air comprimé, alimentant le pistolet de peinture. Ainsi, nous sommes sûrs que la forme de l'émetteur se rapproche au mieux de la source réelle de polluant et que le gaz traceur a les mêmes caractéristiques aérodynamiques d'émission que le polluant. Parallèlement à la pulvérisation, des échantillons d'air ont été prélevés séquentiellement sur le périmètre de la zone de pulvérisation. Pour assurer l'alimentation en gaz traceur ( $\text{SF}_6$ ), un cylindre d'hexafluorure de soufre pur sous pression muni d'un régulateur de pression a été utilisé. Le débit volumique de  $\text{SF}_6$  est contrôlé par une valve branchée au cylindre de  $\text{SF}_6$  pur. Le débit volumique d'injection de  $\text{SF}_6$  est mesuré par un débitmètre massique (MKS). Notons que le débit volumique d'injection du gaz traceur est enregistré chaque seconde durant toute la durée du test par l'appareil Digital datalogger. De même, le débit de l'air comprimé qui alimente le pistolet est constant dans chaque test ; ce dernier est contrôlé par une valve et mesuré par un rotamètre. Au niveau de la buse du pistolet, nous obtenons un mélange homogène de gaz traceur ( $\text{SF}_6$ ) et d'air. Le gaz traceur pur subit une première dilution dans le conduit de l'air comprimé qui alimente le pistolet et une deuxième dilution au niveau de la cheminée d'extraction. Pour déterminer le débit volumique d'injection (DVI) du gaz traceur ( $\text{SF}_6$ ), la formule suivante est utilisée :

$$\text{DVI (l/min)} = [ \text{CT (ppm)} \times \text{DVD (l/min)} ] / \times 10^6 \quad (5)$$

Avec :

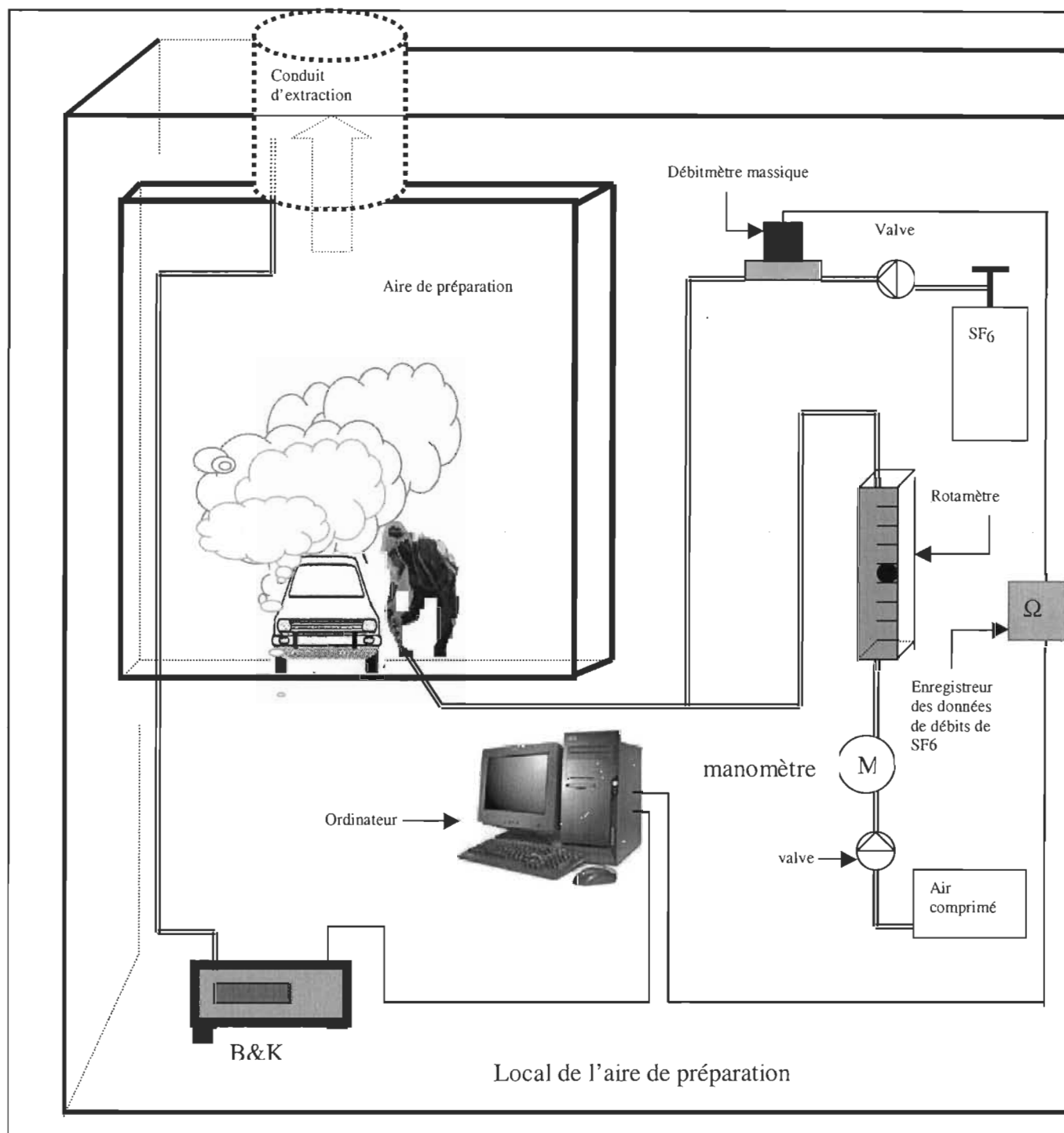
- DVI (l/min) : Débit volumique d'injection ;
- CT : Concentration théorique recherchée ;
- DVD : Débit volumique de dilution (débit dans le conduit de ventilation).

Dans chaque aire de préparation, avant le début des tests, un échantillon d'air a été prélevé afin de déterminer la concentration ambiante moyenne du traceur ( $C_1$ ). Les filtres et les grilles d'extraction ont été enlevés, le mélange de  $SF_6$  et d'air comprimé est émis à débit constant directement dans le conduit d'extraction en utilisant le pistolet de peinture. La concentration moyenne de traceur dans la cheminée de l'aire de préparation ( $C_2$ ) est mesurée, et correspond à une concentration où l'efficacité de captage est de 100 %. Après cela, les filtres et les grilles d'extraction ont été mis en place. Une automobile a été introduite dans l'aire de préparation pour la peindre. Lors de la pulvérisation de la peinture, la mesure de la concentration moyenne du traceur dans la cheminée ( $C_3$ ) est mesurée, au même point où la concentration de traceur qui correspond à une efficacité de captage de 100 % est déterminée.

Enfin, après stabilisation du niveau résiduel, la concentration moyenne ambiante du traceur ( $SF_6$ ) a été mesurée, l'efficacité de captage du système de ventilation des aires de préparation est déterminée à l'aide de la formule suivante:

$$\eta_c = [(C_3 - C'_1) / (C_2 - C_1)] \times 100 \quad (6)$$

Pour déterminer la concentration du gaz traceur dans la cheminée, un analyseur multi-gaz (Bruel & Kjaer, modèle 1302 avec filtres optiques UA- 976 et 987) a été utilisé. Ce dernier est branché à un ordinateur afin d'enregistrer et de visualiser les valeurs détectées (voir Figure 9). Les concentrations de traceur ont été déterminées par chromatographie à capture d'électrons à l'aide d'un appareil de marque Lagus Applied Technology (modèle Autotrac) ou par le Bruel & Kjaer (B&K) selon la page des concentrations. Des tests préalables d'interférences sur l'analyseur multi-gaz (B&K) ont été faits dans le laboratoire d'aérosol de l'IRSST afin de s'assurer que la présence des solvants de peinture n'a engendré aucun phénomène d'interférence.



**Figure 9. Montage de la méthode de gaz traceur**

Les paramètres aérodynamiques (vitesse, débit, pression) ont été mesurés pour chacune des installations de ventilation des aires de préparation. Une source fumigène à haut débit a été utilisée pour visualiser les mouvements de l'air à l'intérieur des cabines ainsi que les émissions fugitives vers l'extérieur de l'aire de préparation. La fumée est produite par la condensation à température ambiante des vapeurs d'alcools qui sont chauffées par une source thermique. Certaines séquences des essais ont été filmées par une caméra vidéo numérique.

### **2-3-1/ Échantillonnage de gaz traceur (SF<sub>6</sub>)**

Après émission du gaz traceur (SF<sub>6</sub>) dans l'air comprimé et au cours de la pulvérisation de la peinture, des modules automatisés de prélèvement ont été utilisés pour échantillonner en six points fixes, au voisinage et dans l'aire de préparation et au niveau de l'unité de compensation d'air. Le module automatisé de prélèvement est un équipement d'échantillonnage à échantillons multiples. Son utilisation permet un prélèvement automatique et séquentiel de plusieurs échantillons à des intervalles de temps prédéterminés. Son principe de fonctionnement est simple: une pompe de prélèvement alimente un distributeur auquel sont raccordés dix sacs d'échantillonnage. Chaque sac est rempli séquentiellement et le volume prélevé est déterminé par la durée de pompage. Des sacs d'échantillonnage de volume d'un litre ont été utilisés dans tous les tests qui ont été faits dans les trois aires de préparation. La pompe est étalonnée par un débitmètre électronique, son débit est de 0,33 l/min lors de nos tests dans les différentes aires de préparation.

La technique de prélèvement automatisé est utile, notamment lors de l'évaluation de l'efficacité de confinement du système de ventilation utilisant la technique de mesure par traçage. Cette technique est un bon outil pour l'évaluation de la concentration du SF<sub>6</sub> dans le temps et l'espace afin de mieux saisir sa cinétique de dispersion. En effet, l'utilisation, en simultané, de plusieurs modules de prélèvement permet de prélever plusieurs échantillons à la fois et ce, à des endroits différents. Les concentrations de SF<sub>6</sub> obtenues après analyse permettent de cartographier sa dispersion pour la période de temps couvrant la série de prélèvements.

### **2-3-2 / Fréquences des prélèvements**

Les périodes d'échantillonnage pour les différents contaminants englobaient le temps de pulvérisation et le temps d'arrêt pour le remplissage du pistolet. La période d'échantillonnage de SF<sub>6</sub> variait entre 25 et 30 minutes pendant l'application de peinture de l'auto pour tous les points d'échantillonnage fixes répartis à l'intérieur et à l'extérieur de l'aire de préparation. Le prélèvement des échantillons d'air de volume d'un litre a été effectué toutes les trois minutes à l'aide des modules automatisés de prélèvement. Entre quatre et six échantillons de SF<sub>6</sub> à des postes fixes ont été pris dans chaque aire de préparation. Le débit de prélèvement était de 0,33 l/min.

La fréquence d'échantillonnage des isocyanates, que ce soit pour l'échantillonnage personnel dans la zone respiratoire du peintre ou dans les points fixes à l'intérieur de l'aire de préparation, était de l'ordre de 15 minutes chacun. Deux prélèvements consécutifs ont été effectués lors de l'application de la peinture dans la zone respiratoire du peintre et dans les points d'échantillonnage fixes à l'intérieur de l'aire de préparation.

Par contre, dans les points d'échantillonnage des isocyanates, à l'extérieur de l'aire de préparation, l'échantillonnage s'est fait en continu durant 30 minutes. Concernant l'échantillonnage des solvants, il était d'une durée de 50 minutes, à tous les points fixes.

## **2-4 / Instrumentation**

Les analyseurs multi-gaz de type 1302 (B&K) utilisés ont été étalonnés suivant les indications fournies par le fabricant et les méthodes d'étalonnage de l'IRSST, avant chaque visite à l'aire de préparation.

L'étalonnage des B&K a été effectué en utilisant des cylindres de gaz de SF<sub>6</sub> comprimé provenant de la compagnie BOC Gaz. Le contenu du cylindre de gaz de SF<sub>6</sub> pur est vérifié avant chaque test, afin de s'assurer qu'il contient une quantité suffisante de SF<sub>6</sub> pour effectuer le test. L'analyseur multi-gaz a été équipé par des filtres optiques spécifiques pour le SF<sub>6</sub>, le premier est équipé par un filtre UA 0988 et le deuxième par un filtre UA 0976. Des tests d'interférences sur le B&K ont été effectués afin de vérifier s'il existe un phénomène d'interférence ou non lors de la présence des solvants ou des catalyseurs de peinture à base d'isocyanate. À l'aide d'une seringue, une faible quantité des solvants de peinture a été injectée dans un sac d'échantillonnage qui contient du SF<sub>6</sub>, le sac est agité durant 15 minutes et ensuite analysé par le B&K afin d'en tester la réponse. L'analyseur multi-gaz est équipé par des filtres optiques spécifiques au SF<sub>6</sub>. Deux tests d'interférences ont été effectués avec deux quantités de mélange différentes de solvants de peinture. Le premier test a été effectué avec un mélange de cinq micro-litres de solvants de peinture, le deuxième test, avec un mélange de dix micro-litres. Les résultats de ces tests sont présentés dans le chapitre III.



Le débitmètre massique, utilisé pour déterminer le débit de SF<sub>6</sub> injecté dans l'air comprimé a été étalonné. De même, le rotamètre utilisé pour mesurer le débit de l'air comprimé alimentant le pistolet a également été étalonné dans le laboratoire d'aérosol de l'IRSST. Toutes les pompes de types Gilair HFS113 et Gilair LFS113, utilisées pour échantillonner le SF<sub>6</sub>, les solvants et le catalyseur, ont été calibrées par un débitmètre à bulles.

## 2-5 / Analyse statistique

Les résultats de mesures de la concentration du gaz traceur dans la cheminée (C<sub>3</sub>) ont été traités statistiquement, afin de définir la concentration C<sub>3</sub> (95%). C'est la valeur de C<sub>3</sub> qui est dépassée pendant 95 % de la durée de mesurage spécifiée. Cette valeur intervient dans le calcul de l'efficacité minimale de captage définie par l'expression suivante :

$$\eta_c(95\%) = [C_3(95\%) - C'_1] / (C_2 - C_1) \quad (7)$$

D'après le Comité européen de normalisation (1996), une hypothèse d'une distribution gaussienne de C<sub>3</sub> est supposée, la valeur de C<sub>3</sub> (95%) est déterminée à partir de la valeur moyenne et l'écart-type de C<sub>3</sub>.

Les résultats des mesures sont donnés avec l'incertitude sur les résultats. L'incertitude sur l'efficacité minimale  $\eta_c$  (95%) est en fonction de nombreux paramètres, notamment de la composante aléatoire de l'incertitude sur C<sub>3</sub> (95%).

Cette composante aléatoire, qui dépend du nombre de points indépendants réalisés lors de la mesure de  $C_3$ , peut être estimée en supposant, une fois encore, que les concentrations  $C_3$  suivent une loi normale.

Au cours de cette étude, les performances des systèmes de ventilation ont été déterminées à l'aide du coefficient de variation. Les résultats et les calculs de  $\eta_c(95\%)$  ainsi que le coefficient de variation sont présentés dans le chapitre III.

Concernant l'échantillonnage de  $SF_6$ , les distributions des concentrations de  $SF_6$  dans l'aire de préparation au cours de l'échantillonnage ont été étudiées séparément. La distribution des concentrations a été vérifiée par les tests statistiques d'usage afin de choisir le type d'analyse statistique adéquat à effectuer. Le logiciel "A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures" a été utilisé pour effectuer ces tests. Un test ANOVA a été appliqué sur les concentrations de  $SF_6$ , dans le cas d'une distribution log-normale et sur le log-normale des concentrations de  $SF_6$  dans le cas d'une distribution normale pour vérifier si la variabilité entre les postes est suffisamment grande pour la distinguer de la variabilité aux postes.

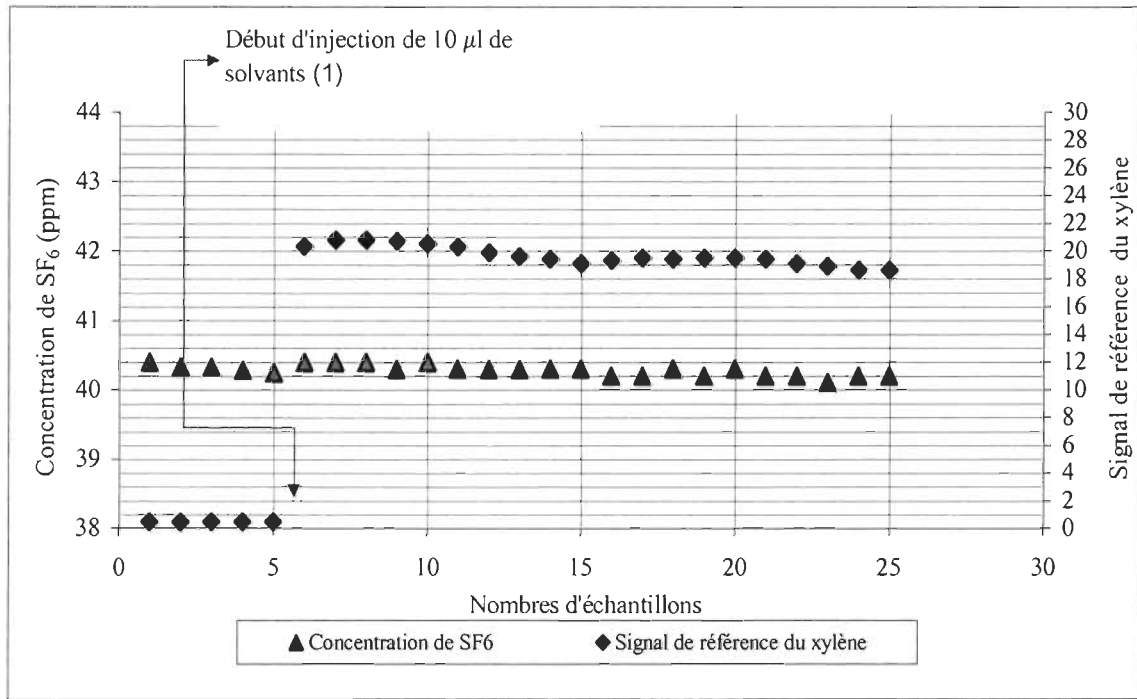
## CHAPITRE III

### INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

#### **3-1/ Test d'interférences sur l'analyseur multi-gaz (B&K) en présence d'hexafluorure de soufre et de solvants de peinture**

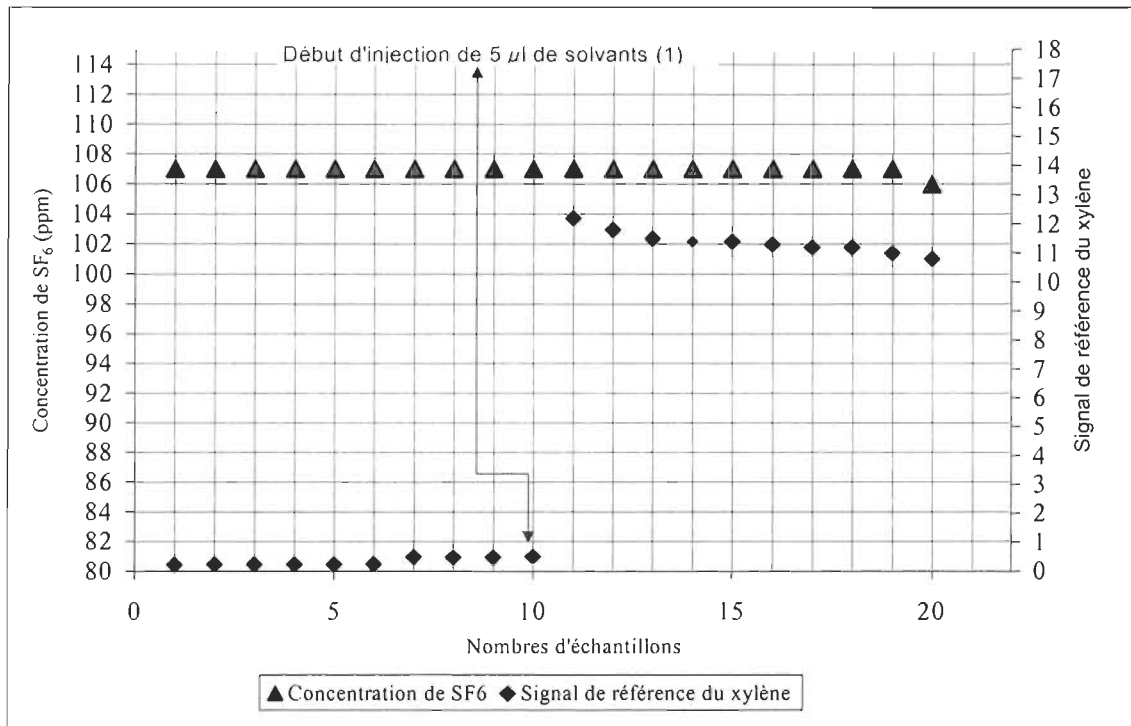
Cette partie présente les résultats des tests qui ont été effectués sur l'analyseur multi-gaz (Buel&Kjaer) pour voir s'il existe une possibilité d'un phénomène d'interférences dues à la présence des solvants de peinture (acétate de butyle normal, acétate d'éthyle, éthylbenzene, toluène et xylène). À l'aide d'une seringue, une faible quantité des solvants de peinture a été injectée dans un sac d'échantillonnage qui contient du SF<sub>6</sub>. Le sac est agité durant 15 minutes et ensuite analysé par le Buel&Kjaer (B&K). Deux tests d'interférences ont été effectués avec deux quantités de mélange de solvants de peinture. Le premier test a été effectué avec un mélange de cinq microlitres de solvants de peinture, le deuxième test, avec un mélange de dix microlitres.

Une exposition pendant 30 minutes n'a engendré aucune réponse erronée. Les figures 10 et 11 présentent les variations des concentrations de SF<sub>6</sub> dans le sac d'échantillonnage avant et après les injections instantanées de solvants de peinture. Selon la fiche technique d'échantillonneur et doseur multipoint-type1303, l'analyseur multigaz (B&k) a une précision de  $\pm 1 \%$ . D'après les figures 10 et 11, les fluctuations des concentrations de SF<sub>6</sub> sont toujours inférieures à  $\pm 1 \%$ .



(1): Période de mélange de 15 minutes.

**Figure 10. Variations des concentrations de SF<sub>6</sub> lors d'une injection de 10 microlitres ( $\mu$ L) de solvants de peinture**



(1) : Période de mélange de 15 minutes.

**Figure 11. Variations des concentrations de SF<sub>6</sub> lors d'une injection de 5 µL de solvants de peinture**

### **3-2/ Données brutes des échantillonnages et des paramètres aérauliques pour chaque aire de préparation**

Les résultats de ces interventions ont contribué à valider la méthode de traçage et, également, à en documenter l'application en milieux industriels. De plus, ces interventions ont permis d'établir différents profils d'exposition des travailleurs dans le voisinage des aires de préparation.

La validation de la méthode de traçage repose sur quelque 300 échantillons environnementaux. Le tableau 1 présente une synthèse des concentrations moyennes de  $\text{SF}_6$  et des paramètres aérauliques mesurés à chacune des aires de préparation.

Tableau 1

**Paramètres aérauliques et les concentrations d'hexafluorure de soufre dans la cheminée lors de la pulvérisation de peinture aux trois aires de préparation**

	Système d'aspiration au plancher avec compensation d'air dans le local (A)	Système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B)	Système d'aspiration latéral sans air de compensation (C)
[SF <sub>6</sub> ] <sub>moyenne</sub> dans la cheminée lors d'application de la peinture (ppm)	20,94	23,46	34,2
L'écart-type de la [SF <sub>6</sub> ] <sub>moyenne</sub> dans la cheminée lors de l'application de la peinture	2,46	2,6	9,07
[SF <sub>6</sub> ] <sub>moyenne</sub> dans la cheminée à 100 % d'efficacité de captage (ppm)	29,25	29,93	49
Nombre des mesures des [SF <sub>6</sub> ] dans la cheminée lors d'application de peinture	13	14	25
Débit d'évacuation moyenne (m <sup>3</sup> /min)	272	269	276
Débit d'alimentation moyenne (m <sup>3</sup> /min)	Pas d'alimentation	297	Pas d'alimentation
Pression statistique moyenne avant les filtres (Pascal)	150	149,2	149
Débit d'injection de SF <sub>6</sub> (L/ min)	8,1	8,2	8,1
Nombre d'échantillons des solvants	1 personnel + 4 pour des points fixes	1 personnel + 4 pour des points fixes	1 personnel + 4 pour des points fixes
Nombre d'échantillons de SF <sub>6</sub> prélevés par les modules automatisés de prélèvement	80	80	140
Nombre d'échantillons d'isocyanate	1 personnel + 8 pour des points fixes	1 personnel + 8 pour des points fixes	1 personnel + 8 pour des points fixes
Nombre des points d'échantillonnages	Poste personnel + cinq points d'échantillonnages fixes	Poste personnel + cinq points d'échantillonnages fixes	Poste personnel + sept points d'échantillonnages fixes
Concentration de SF <sub>6</sub> avant l'échantillonnage (bruit de fond) ptt	382	676	538
Quantité de peinture consommée (L/min)	4	4	4

### **3-3 / Système d'aspiration au plancher avec compensation d'air dans le local (A)**

Les concentrations de contaminants chimiques prélevés dans les différents postes ainsi que les résultats des essais avec la technique par traçage sont présentés et traités statistiquement pour chacune des aires de préparation.

Dans cette partie, les résultats des prélèvements et des analyses qui ont été effectuées dans l'aire de préparation munie d'un système d'aspiration au plancher avec compensation d'air dans le local (A) ont été étudiés et traités statistiquement. De même, l'efficacité de confinement théorique de ce système de ventilation a été calculée et comparée avec le résultat expérimental. Les variations des concentrations de SF<sub>6</sub> aux différents points d'échantillonnage dans le voisinage de l'aire de préparation ont été comparées.

#### **3-3-1 / Distribution du SF<sub>6</sub> autour de l'aire de préparation (A) lors de l'application de peinture**

Si une partie du gaz traceur (SF<sub>6</sub>) n'est pas confinée, il est important de connaître le type de la distribution temporelle des concentrations observées aux points d'échantillonnage placés dans le voisinage des aires de préparation. Une comparaison de la distribution des concentrations du SF<sub>6</sub> entre les différents points d'échantillonnage a été faite.

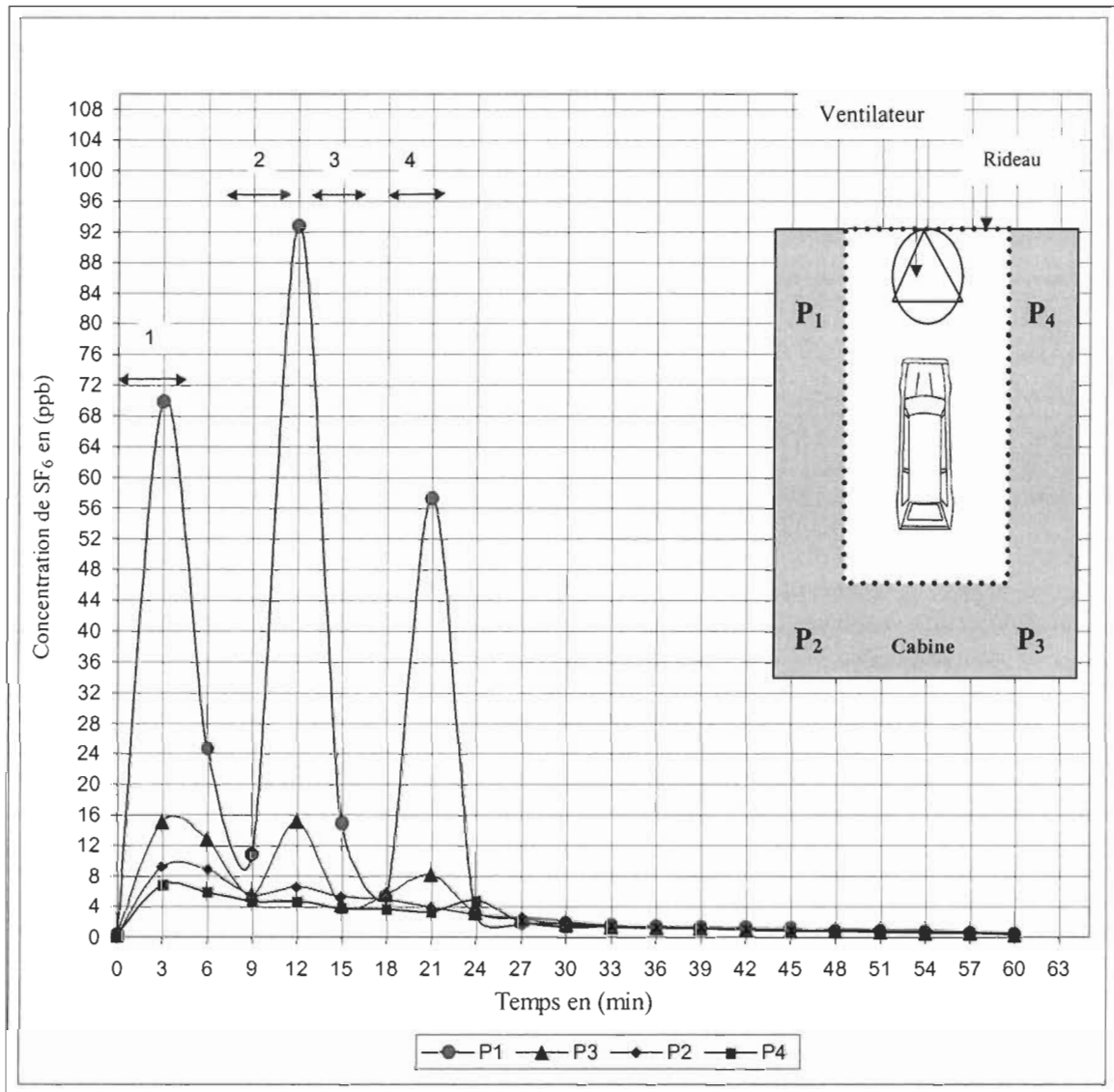
La distribution des concentrations pour chaque point d'échantillonnage et pour chaque système de ventilation d'aire de préparation a été déterminée à l'aide du logiciel «A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures». Le test de « W-test »



confirme avec une certitude de 95 % ( $P = 0,05$ ) que les distributions temporelle des concentrations de  $\text{SF}_6$  lors de l'application de la peinture aux quatre postes sont log-normales.

Les échantillons étant recueillis dans des sacs d'un litre (Cali-5-Bond), il est advenu, dans certains cas, que moins d'échantillons soient prélevés en raison de divers problèmes techniques, notamment le raccrochement inadéquat de certains sacs d'échantillonnage.

La concentration moyenne de  $\text{SF}_6$  au point d'échantillonnage 1 est égale à 26 parties par milliards (ppb) (voir Figure 12 et Annexe B). Le coefficient de variation de la distribution des concentrations de  $\text{SF}_6$  pour le point d'échantillonnage 1 est égal à 1,56. Sa concentration élevée peut être expliquée par l'étanchéité partielle du rideau du côté où se situe le point d'échantillonnage 1. Concernant le point d'échantillonnage 2, sa concentration moyenne de  $\text{SF}_6$  se situe à 5,3 ppb, son coefficient de variation égal à 0,8 (voir Annexe C). La concentration moyenne de  $\text{SF}_6$  mesurée au point d'échantillonnage 3 se situe à 6,8 ppb, avec un coefficient de variation égal à 0,53 (voir Annexe D). Pour le point d'échantillonnage 4, sa concentration moyenne de  $\text{SF}_6$  se situe à 4,19 ppb et son coefficient de variation est égal à 0,5 (voir Annexe E). Les coefficients de variation du point d'échantillonnage 2, 3 et 4 sont tous de même ordre de grandeur. Par contre, le coefficient de variation du point d'échantillonnage 1 est élevé. Ceci révèle que la concentration de  $\text{SF}_6$ , qui fuit au poste 1, n'est pas homogène. Cela pourrait être expliqué par l'arrêt de l'application de peinture par le peintre pour remplir son pistolet. Au cours de cette période, la concentration de  $\text{SF}_6$ , qui fuit au point d'échantillonnage 1, baisse énormément (voir Figure 12).



1, 2, 3 et 4 : Périodes d'injection du traceur. P1, P2, P3 et P4 : Points d'échantillonnage.

**Figure 12. Variation de la concentration de  $\text{SF}_6$  dans le voisinage de l'aire de préparation (A)**

D'après la figure 12, chaque fois que l'injection de  $\text{SF}_6$  est arrêtée, les concentrations de  $\text{SF}_6$  aux points d'échantillonnages fixes de  $\text{SF}_6$  baissent. D'après la

courbe de débit d'injection de  $\text{SF}_6$  (Figure 14), les arrêts d'injection se font presque toutes les quatre ou cinq minutes d'application des peintures. Pendant les 24 minutes d'application de la peinture, le peintre arrête la pulvérisation de peinture trois fois. Le recommencement de l'application des peintures est accompagné par une augmentation des concentrations de  $\text{SF}_6$  aux différents points d'échantillonnage. L'augmentation des concentrations de  $\text{SF}_6$  aux points d'échantillonnage 1, 2, 3 et 4 se manifeste avec un décalage par rapport à l'augmentation des concentrations de  $\text{SF}_6$  dans la cheminée (voir Figures 12 et 14). Ce décalage est dû au temps de diffusion nécessaire pris par le  $\text{SF}_6$  pour qu'il puisse arriver aux différents points d'échantillonnage. De même, la concentration maximale de  $\text{SF}_6$  varie d'un point à un autre. D'après la figure 14 et la cassette vidéo filmée lors de l'échantillonnage, les concentrations de  $\text{SF}_6$  aux différents points d'échantillonnage dépendent de la position du peintre par rapport à la fosse d'évacuation lors des applications de peinture.

### **3-3-2/ Comparaison des concentrations de $\text{SF}_6$ des différents postes d'échantillonnage**

Les concentrations des échantillons prélevés aux quatre points d'échantillonnage dans le voisinage de l'aire de préparation ont été comparées afin de démontrer s'il y a une différence significative entre les concentrations.

Le test ANOVA (analyse de variance) unilatéral est appliqué pour étudier la variance de la concentration de  $\text{SF}_6$  d'une position à une autre. Le test ANOVA est basé sur deux hypothèses : l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) où il n'y a pas de différence de concentrations entre les quatre points d'échantillonnage, c'est-à-dire que la variabilité des résultats ne

change pas d'une position à une autre et l'hypothèse alternative ( $H_1$ ) où il y a une variabilité significative des concentrations d'une position à une autre. Le tableau 2 présente un rapport détaillé sur les données de base de ce test.

**Tableau 2**

**Les données de base des quatre points d'échantillonnage de (A)**

Groupes	Nombre d'échantillons	Somme	Moyenne	Variance
1	10	282,85	28,28	1085,79
2	10	74,50	7,45	27,07
3	10	52,65	5,26	6,20
4	10	41,90	4,19	2,69

Le tableau 3 présente les résultats du test de ANOVA pour les quatre points d'échantillonnage dans le voisinage de l'aire de préparation.

**Tableau 3**

**Résultats du test ANOVA effectué sur les concentrations de  $SF_6$  des quatre points d'échantillonnage de (A)**

Source des variations	Degré de liberté	F calculé	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	3	4,64	0,00764	2,86
A l'intérieur des groupes	36			
Total	39			

Pour ce tableau, la valeur de F calculée est de 4,6 et la valeur critique de F pour un  $P < 0,05$  est de 2,8. La valeur de F calculée est supérieure à la valeur critique, ce qui signifie

que, statistiquement, il y a une variabilité significative des concentrations de  $\text{SF}_6$  d'un point à un autre ( $H_1$ ), par conséquent l'hypothèse nulle (il n'y a pas de différence de concentration de  $\text{SF}_6$  entre les quatre points d'échantillonnage, c'est-à-dire toutes les concentrations de  $\text{SF}_6$  sont tirées de la même population et la variabilité des concentrations de  $\text{SF}_6$  ne change pas d'un point d'échantillonnage à un autre) est rejetée.

De plus, un autre test ANOVA a été appliqué sur les concentrations de  $\text{SF}_6$  détectées dans les points d'échantillonnage 2, 3 et 4 afin de déterminer s'il existe une différence entre les concentrations de  $\text{SF}_6$  détectées dans ces trois points d'échantillonnage. Le tableau 4 présente un rapport détaillé sur les données de base de ce test.

**Tableau 4**

**Les données de base des trois points d'échantillonnage de (A)**

Groupes	Nombre d'échantillons	Somme	Moyenne	Variance
2	11	74,89	6,80	28,9
3	11	42,28	3,84	3,74
4	11	53,03	4,82	7,74

Le tableau 5 présente les résultats du test de ANOVA pour les trois points d'échantillonnage dans le voisinage de l'aire de préparation.

**Tableau 5**

**Résultats du test ANOVA effectué sur les concentrations  
de SF<sub>6</sub> des trois points d'échantillonnage de (A)**

Source des variations	Degré de liberté	F calculé	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	2	1,863	0,1726	3,3158
A l'intérieur des groupes	30			
Total	32			

Les résultats du tableau 5 indiquent que la valeur de F calculée est de 1,8 et la valeur critique de F est de 3,3. La valeur du F calculée est inférieure à la valeur critique, ce qui signifie que statistiquement toutes les concentrations de SF<sub>6</sub> sont tirées de la même population et que la variabilité des concentrations de SF<sub>6</sub> ne change pas d'un point d'échantillonnage à un autre, avec une limite de confiance de 95 %.

Un autre test d'analyse de variance a été appliqué sur l'ensemble des concentrations de SF<sub>6</sub> détectées dans les trois points d'échantillonnage (points d'échantillonnage numéro 2, 3 et 4) et les concentrations de SF<sub>6</sub> détectées dans le point d'échantillonnage 1. Le tableau 6 présente les données de base de ce test.

**Tableau 6**  
**Les données de base des deux groupes des concentrations**  
**de SF<sub>6</sub> de (A)**

Groupes	Nombre d'échantillons	Somme	Moyenne	Variance
2, 3 et 4	33	170,216	5,158	14,192
1	11	283,242	25,749	1047,979

Le tableau 7 présente les résultats du test d'analyse de variance (ANOVA) pour les deux groupes de concentrations de SF<sub>6</sub>. Le premier groupe est formé par l'ensemble des concentrations des points d'échantillonnage 2, 3 et 4. Le deuxième groupe est formé par les concentrations détectées dans le point d'échantillonnage 1.

**Tableau 7**  
**Résultats du test ANOVA effectué sur les concentrations**  
**de SF<sub>6</sub> des deux groupes de (A)**

Source des variations	Degré de liberté	F calculé	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	1	13,4365	0,0006873	4,07
A l'intérieur des groupes	42			
Total	43			

Les résultats du tableau 7 indiquent que la valeur de F calculée est de 13,4 et la valeur critique de F est de 4. La valeur du F calculée est supérieure à la valeur critique, ce qui signifie que statistiquement il y a une variabilité significative des concentrations de SF<sub>6</sub> d'un groupe à un autre (H<sub>1</sub>), par conséquent l'hypothèse nulle est rejetée.

### **3-3-3 / L'efficacité du système d'aspiration au plancher avec compensation d'air**

#### **dans le local (A)**

Les mesures des concentrations de SF<sub>6</sub> dans la cheminée sont utilisées pour déterminer l'efficacité expérimentale de ce système de ventilation. La figure 13 présente les variations théoriques et expérimentales des concentrations de SF<sub>6</sub> dans la cheminée lors d'une injection directe de SF<sub>6</sub> dans le conduit d'évacuation. La valeur de la concentration de l'équilibre expérimental dans la cheminée lors d'une injection directe de SF<sub>6</sub> dans les grilles d'extraction est 29,25 partie par million (ppm) (voir Figure 13b et Annexe G). Cette valeur présente la concentration de SF<sub>6</sub> dans le conduit pour une efficacité de confinement de 100 % (voir Figure 13b).

La concentration théoriquement de SF<sub>6</sub> dans la cheminée lors d'une injection directe dans la fosse d'extraction peut être calculée par l'équation (8) suivante:

$$CT \text{ (ppb)} = DVI \text{ (L/min)} * 10^9 / DVD \text{ (L/min)} \quad (8)$$

Où; DVI : Débit volumique d'injection;

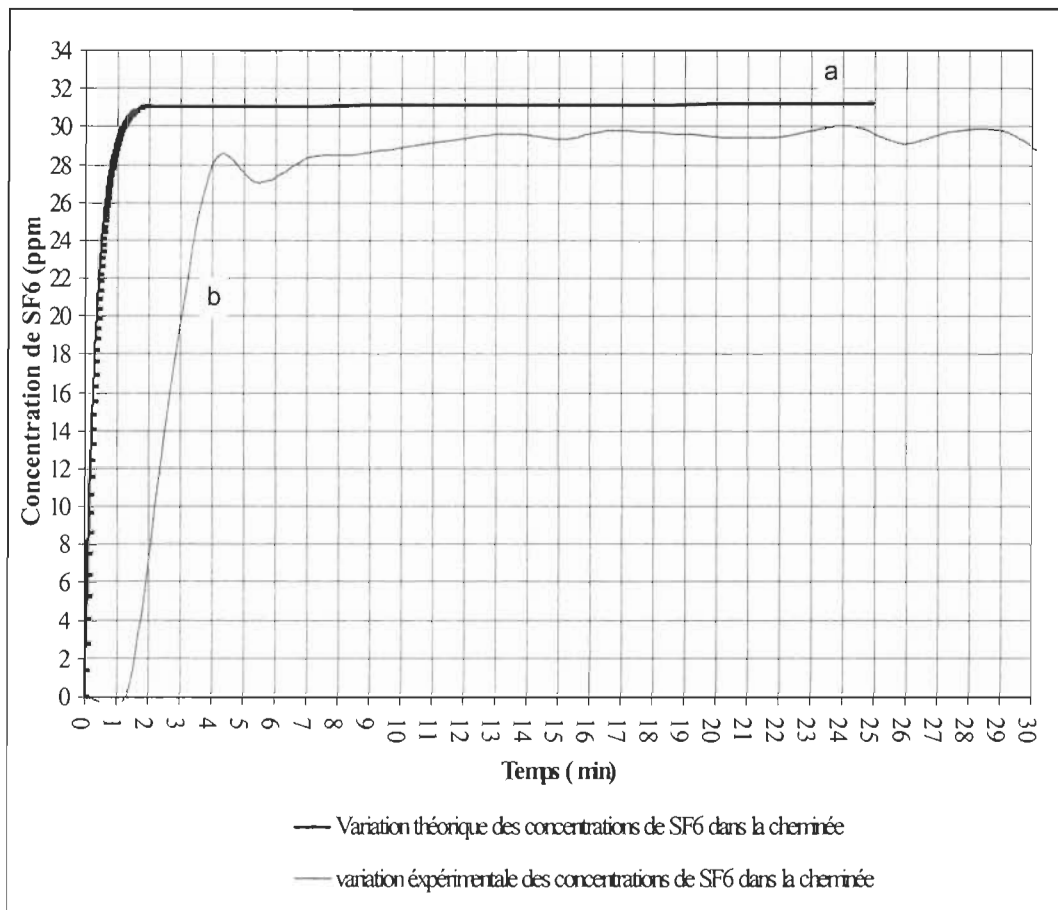
CT : Concentration théorique recherchée;

DVD : Débit volumique de dilution (Débit dans le conduit de ventilation).

Le traçage de la courbe de variation théorique de la concentration de SF<sub>6</sub> dans le conduit d'extraction lors d'une injection directe du SF<sub>6</sub> dans la fosse d'extraction démontre que la concentration théorique de SF<sub>6</sub> atteint un plateau avec une concentration d'équilibre égale à



31,2 ppm (voir Figure 13a). Cette aire de préparation a un débit d'évacuation égal à 272 m<sup>3</sup>/min, un volume de 95,72 m<sup>3</sup>. Le taux de génération du SF<sub>6</sub> au cours du test est de 8,1 L/min. D'après l'équation (7), le temps d'équilibre théorique de la concentration de SF<sub>6</sub> dans le conduit d'évacuation est de 96 secondes, sachant que le temps d'équilibre expérimental est de trois minutes.



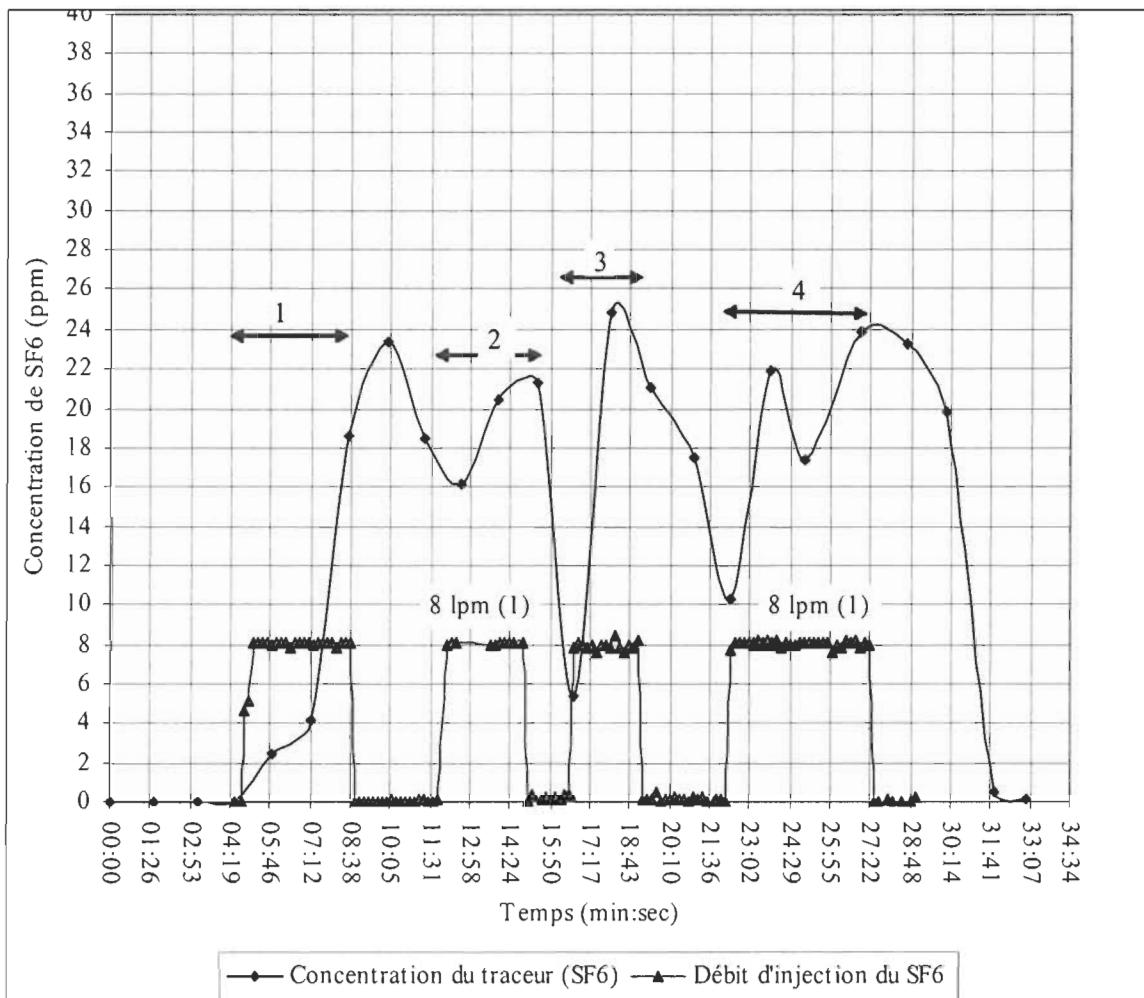
**Figure 13. Variations expérimentale et théorique des concentrations de SF<sub>6</sub> dans la cheminée lors d'une injection directe dans le fosse d'extraction de (A)**

La valeur moyenne de la concentration de SF<sub>6</sub> dans le conduit d'évacuation lors de l'application de la peinture est de 20,9 ppm (voir Annexe F). La figure 14 présente la

variation de la concentration de  $\text{SF}_6$  dans la cheminée lors de l'application de la peinture, sachant que les trois points de concentration – 16,2 ppm, 3 ppm et 10,3 ppm – correspondent respectivement aux premier, deuxième et troisième arrêts de l'application de la peinture, ce qui explique la chute des concentrations de  $\text{SF}_6$ . Au cours du traitement statistique des concentrations de  $\text{SF}_6$  mesurées dans la cheminée lors de l'application de la peinture, ces trois points d'arrêt ont été rejetés. Le test de « W-Test » confirme avec une certitude de 95 % ( $P = 0,05$ ) que la distribution des concentrations de  $\text{SF}_6$  dans la cheminée lors de l'application de la peinture est log-normales, avec un écart-type égal à 2,48.

D'après la figure 14, la concentration de  $\text{SF}_6$  dans le conduit lors de l'application de la peinture atteint un plateau de concentration moyenne de 20,9 ppm. Ce plateau présente quelques fluctuations engendrées par deux phénomènes : les trois arrêts de l'application de la peinture et la position du peintre par rapport à la fosse d'extraction. De plus, d'après la figure 14, les temps des chutes des concentrations de  $\text{SF}_6$  dans la cheminée ne coïncident pas avec les arrêts d'injection de  $\text{SF}_6$  (les arrêts de l'application de la peinture). Les chutes des concentrations de  $\text{SF}_6$  dans la cheminée se manifestent un peu plus tard par rapport aux temps d'arrêt de la pulvérisation de la peinture.

D'après la courbe de variation de débit d'injection de  $\text{SF}_6$  (Figure14), la durée de chaque arrêt de pulvérisation se situe entre 2 et 3 minutes. Pendant les 23 minutes d'application de la peinture, le peintre arrête la pulvérisation de peinture trois fois.



1, 2, 3 et 4 : Périodes d'injection du traceur, (1) : Débit d'injection du traceur,

**Figure 14. Variation de débit d'injection et de la concentration de SF<sub>6</sub> dans la cheminée lors de l'application de la peinture dans l'aire de préparation (A)**

L'efficacité du système d'aspiration au plancher avec compensation d'air dans le local a été calculée et les résultats sont présentés dans le tableau 8.

Tableau 8

**L'efficacité du système d'aspiration au plancher avec compensation  
d'air dans le local (A)**

<b>Concentrations de SF<sub>6</sub> dans la cheminée lors de la pulvérisation (ppm)</b>	<b>C<sub>3</sub>( 95 %) ppm</b>	<b>η<sub>C</sub> (95 %) %</b>
18,6	14,16	47
23,4	18,96	63,22
18,5	14,06	46,89
20,4	15,967	53,22
21,23	16,79	56
24,8	20,36	67,89
21,1	16,667	55,55
17,5	13,06	43,53
21,9	17,46	58,22
17,4	12,96	43,22
23,8	19,36	64,55
23,3	18,86	62,89
19,8	15,36	51,22

L'incertitude sur les valeurs des C<sub>3</sub> (95 %) lors de l'application de peinture est de 1,8, sachant que l'incertitude sur les résultats a été calculée suivant la méthode donnée en annexe A. Les valeurs de la concentration moyenne expérimentale et de la concentration moyenne théorique de SF<sub>6</sub> dans la cheminée sont du même ordre de grandeur. Le coefficient de variation a été calculé afin de décrire les performances du système de

ventilation (A). Le tableau 9 présente les paramètres d'évaluation de l'efficacité du système de ventilation.

**Tableau 9**  
**Paramètres d'évaluation de l'efficacité du système d'aspiration**  
**au plancher avec compensation d'air dans le local (A)**

<b>(C<sub>3</sub>( 95 %) moyenne + ΔC<sub>3</sub>( 95 %)) ppm</b>	16,46 + 1,82
<b>η<sub>C</sub> (95 %) %</b>	54,87
<b>Coefficient de variation</b>	0,15
<b>Concentration moyenne de SF<sub>6</sub> (ppm)</b>	20,9

L'efficacité de captage du système d'aspiration au plancher avec compensation d'air dans le local (A) η<sub>C</sub> (95 %) % se situe à 55 % avec un coefficient de variation de 0,15. Ces résultats révèlent que l'efficacité du système d'aspiration au plancher avec compensation d'air dans le locale (A) est faible. Ce résultat est en corrélation avec le résultat de l'échantillonnage aux différents points d'échantillonnage à l'extérieur de l'aire de préparation.

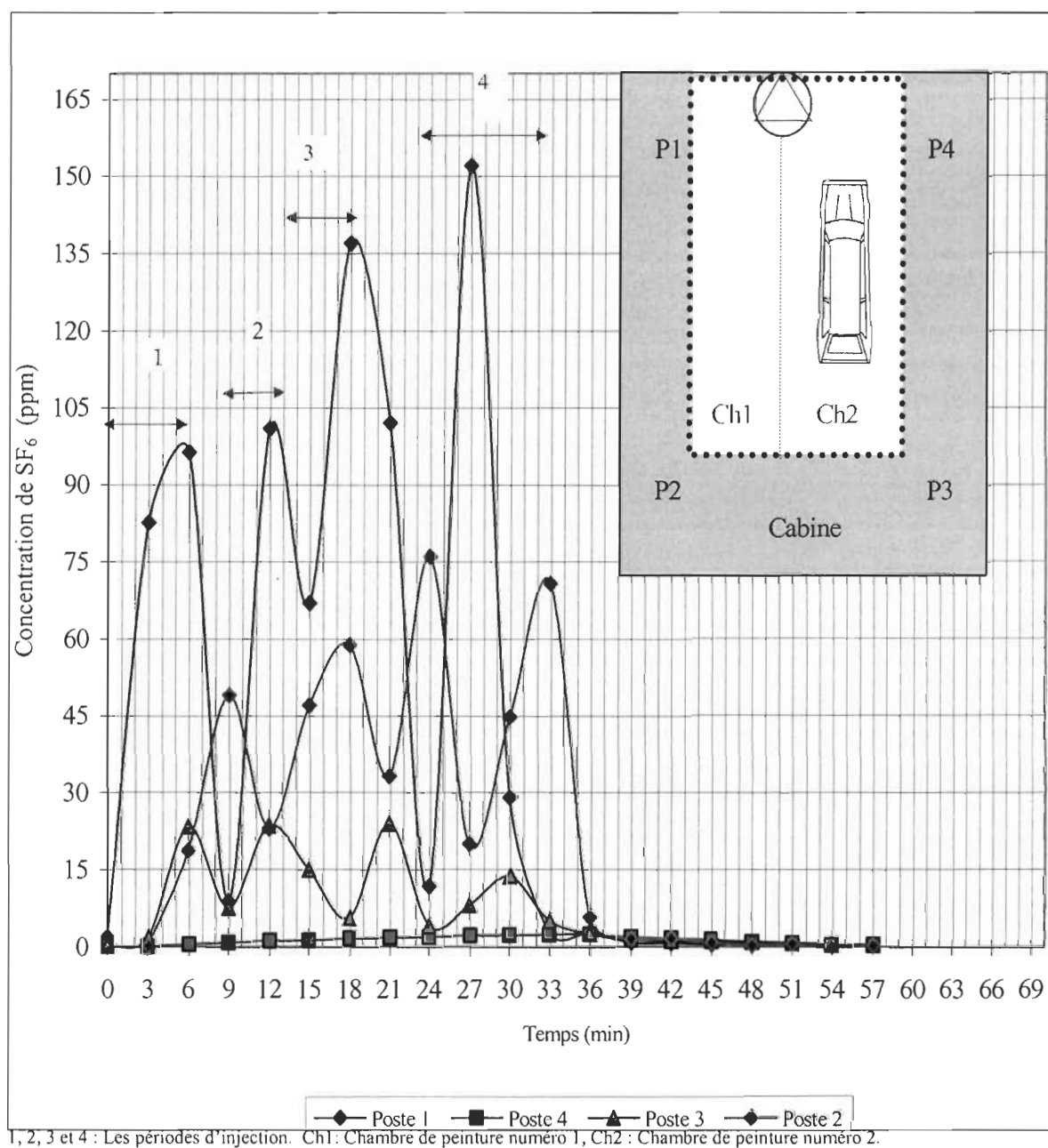
### **3-4 / Système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B)**

#### **3-4-1 / Distribution du SF<sub>6</sub> alentour de l'aire de préparation lors de la pulvérisation de la peinture**

Le type de distribution des concentrations de SF<sub>6</sub> mesurées aux points d'échantillonnage placés au voisinage de l'aire de préparation, après avoir appliqué le test de « W-Test », confirme avec une certitude de 95 % ( P = 0,05) que la distribution des

concentrations de  $\text{SF}_6$  est une distribution normale lors de l'application de la peinture. Des échantillons d'air ont été prélevés 10 fois de suite à 5 points d'échantillonnage pour un total d'environ 30 minutes. La figure 15 montre l'emplacement des échantillonneurs (point d'échantillonnage).

Les valeurs de concentration moyenne de  $\text{SF}_6$  aux points d'échantillonnage 4 et 3 sont respectivement égales à 76 ppm et 40,1 ppm . Les coefficients de variation des points d'échantillonnage 1 et 2 sont situés respectivement à 1,45 et 1,1 (voir Annexes J et K).



**Figure 15. Variations des concentrations de  $\text{SF}_6$  aux points d'échantillonnage au cours de la pulvérisation de peinture dans l'aire de préparation (B)**

La concentration moyenne de  $\text{SF}_6$  mesurée au point d'échantillonnage 2 est égale à 11,36 ppm, avec un coefficient de variation égal à 1,64. Enfin (voir Annexe J), pour le

point d'échantillonnage 1, son coefficient de variation est de l'ordre de 0,44 et sa concentration moyenne se situe à 1,83 ppm (voir Annexe I).

Tous les coefficients de variation des différents points d'échantillonnage ont le même ordre de grandeur. Le phénomène de la baisse des concentrations de  $\text{SF}_6$  lorsque le peintre arrête l'application de la peinture se manifeste aux quatre points d'échantillonnage placés dans le voisinage de l'aire de préparation (voir Figure 15).

Les quatre arrêts de la pulvérisation de la peinture dans ce test sont très courts, les durées de ces arrêts varient entre trente secondes et une minute. Le recommencement de l'application de peinture est accompagné par une augmentation des concentrations de  $\text{SF}_6$  dans les différents points d'échantillonnage. La concentration maximale pour chaque point d'échantillonnage varie en fonction de la localisation du point d'échantillonnage par rapport à l'aire de préparation et à la position du peintre par rapport aux grilles d'évacuation (Visualisation de la cassette vidéo filmée lors de l'échantillonnage). L'augmentation des concentrations de  $\text{SF}_6$  dans tous les points d'échantillonnage est proportionnelle à la durée d'application de la peinture. De même, il y a un phénomène d'accumulation des quantités de  $\text{SF}_6$  aux points d'échantillonnage 3 et 4 lors de l'application de la peinture (voir Figure 15).

#### **3-4-2/ Comparaison des concentrations de $\text{SF}_6$ des différents points d'échantillonnage**

Les concentrations de  $\text{SF}_6$  aux différents points d'échantillonnage ont été comparées. Le test ANOVA (analyse de variance) unilatéral est appliqué pour étudier la



variance de la concentration de  $\text{SF}_6$  d'un point à un autre. Le tableau 10 présente un rapport détaillé sur les données de base de ce test.

**Tableau 10**

**Les données de base des quatre points d'échantillonnage de (B)**

Groupes	Nombre d'échantillons	Somme	Moyenne	Variance
1	10	325,81	32,58	623,17
2	10	608,58	60,85	2571,61
3	10	105,40	10,54	100,6
4	10	9,29	0,93	0,54

Le tableau 11 présente les résultats du test de ANOVA pour les quatre points d'échantillonnage dans le voisinage de l'aire de préparation (B).

**Tableau 11**

**Résultats du test ANOVA effectué sur les concentrations de  $\text{SF}_6$  des quatre points d'échantillonnage de (B)**

Source des variations	Degré de liberté	F calculé	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	3	8,6	0,00019	2,86
A l'intérieur des groupes	36			
Total	39			

Pour ce tableau, la valeur de F calculée est de 8,6 et la valeur critique de F pour un  $P < 0,05$  est de 2,86. La valeur du F calculée est supérieure à la valeur critique, ce qui signifie que, statistiquement, il y a une variabilité significative des concentrations de  $\text{SF}_6$  d'un point d'échantillonnage à un autre ( $H_1$ ), par conséquent l'hypothèse nulle est rejetée.

Un autre test d'ANOVA a été appliqué sur les concentrations de  $\text{SF}_6$  aux points d'échantillonnage 1 et 2 afin de déterminer s'il existe une différence d'exposition entre les deux points d'échantillonnage. Le tableau 12 présente un rapport détaillé sur les données de base de ce test d'ANOVA.

**Tableau 12**

**Les données de base des deux points d'échantillonnage de (B)**

Groupes	Nombre d'échantillons	Somme	Moyenne	Variance
1	11	370,61	33,7	574,42
2	11	760,58	69,14	3069,62

Le tableau 13 présente les résultats du test de ANOVA pour les deux postes d'échantillonnage (1 et 2) dans le voisinage de l'aire de préparation.

**Tableau 13**

**Résultats du test ANOVA effectué sur les concentrations de  $\text{SF}_6$  des deux points d'échantillonnage de (B)**

Source des variations	Degré de liberté	F calculé	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	1	3,79	0,06	4,35
A l'intérieur des groupes	20			
Total	21			

Les résultats du tableau 13 indiquent que la valeur de F calculée est de 3,8 et la valeur critique de F est de 4,35. La valeur du F calculée est inférieure à la valeur critique, ce qui signifie que, statistiquement, toutes les concentrations de  $\text{SF}_6$  sont tirées de la même

population et que la variabilité des concentrations de  $\text{SF}_6$  ne change pas d'un point à un autre avec une limite de confiance de 95 %.

Un autre test d'analyse de variance a été appliqué sur l'ensemble des concentrations de  $\text{SF}_6$  mesurées aux points d'échantillonnage 1 et 2 et les concentrations de  $\text{SF}_6$  détectées dans le point 3. Le tableau 14 présente les données de base de ce test d'ANOVA.

**Tableau 14**  
**Les données de base des deux groupes de (B)**

Groupes	Nombre d'échantillons	Somme	Moyenne	Variance
1	22	1131,19	51,41	2064,41
2	11	113,59	10,32	91,04

Le tableau 15 présente les résultats du test d'analyse de variance (ANOVA) pour les groupes de concentration de  $\text{SF}_6$ . Le premier groupe est formé par l'ensemble des concentrations de  $\text{SF}_6$  aux points d'échantillonnage 1 et 2. Le deuxième groupe est formé par les concentrations de  $\text{SF}_6$  au point d'échantillonnage 3.

**Tableau 15**  
**Résultats du test ANOVA effectué sur les concentrations**  
**de  $\text{SF}_6$  des deux groupes de (B)**

Source des variations	Degré de liberté	F calculé	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	1	8,67	0,006	4,15
A l'intérieur des groupes	31			
Total	32			

Les résultats du tableau 15 indiquent que la valeur de F calculée est de 8,6 et la valeur critique de F est de 4,1. La valeur du F calculée est supérieure à la valeur critique, ce qui signifie que statistiquement il y a une variabilité significative des concentrations de SF<sub>6</sub> d'un poste à un autre (H<sub>1</sub>), par conséquent l'hypothèse nulle est rejetée.

De même, un test d'analyse de variance a été fait sur l'ensemble des concentrations de SF<sub>6</sub> aux points d'échantillonnage 1 et 2 et les concentrations de SF<sub>6</sub> détectées au point d'échantillonnage 4. Le tableau 16 présente les données de base de ce test d'ANOVA.

**Tableau 16**

**Les données de base des deux groupes de (B)**

Groupes	Nombre d'échantillons	Somme	Moyenne	Variance
1	22	1131,2	51,4181	2064,41
2	11	11,459	1,04176	0,6247

Le tableau 17 présente les résultats du test d'analyse de variance pour les deux groupes de concentration de SF<sub>6</sub>. Le premier groupe est formé par l'ensemble des concentrations détectées aux points d'échantillonnage 1 et 2. Le deuxième groupe est formé par les concentrations détectées au point d'échantillonnage 4.

Tableau 17

**Résultats du test ANOVA effectué sur les concentrations  
de SF<sub>6</sub> des deux groupes de (B)**

Source des variations	Degré de liberté	F calculé	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	1	13,30	0,000962	4,16
A l'intérieur des groupes	31			
Total	32			

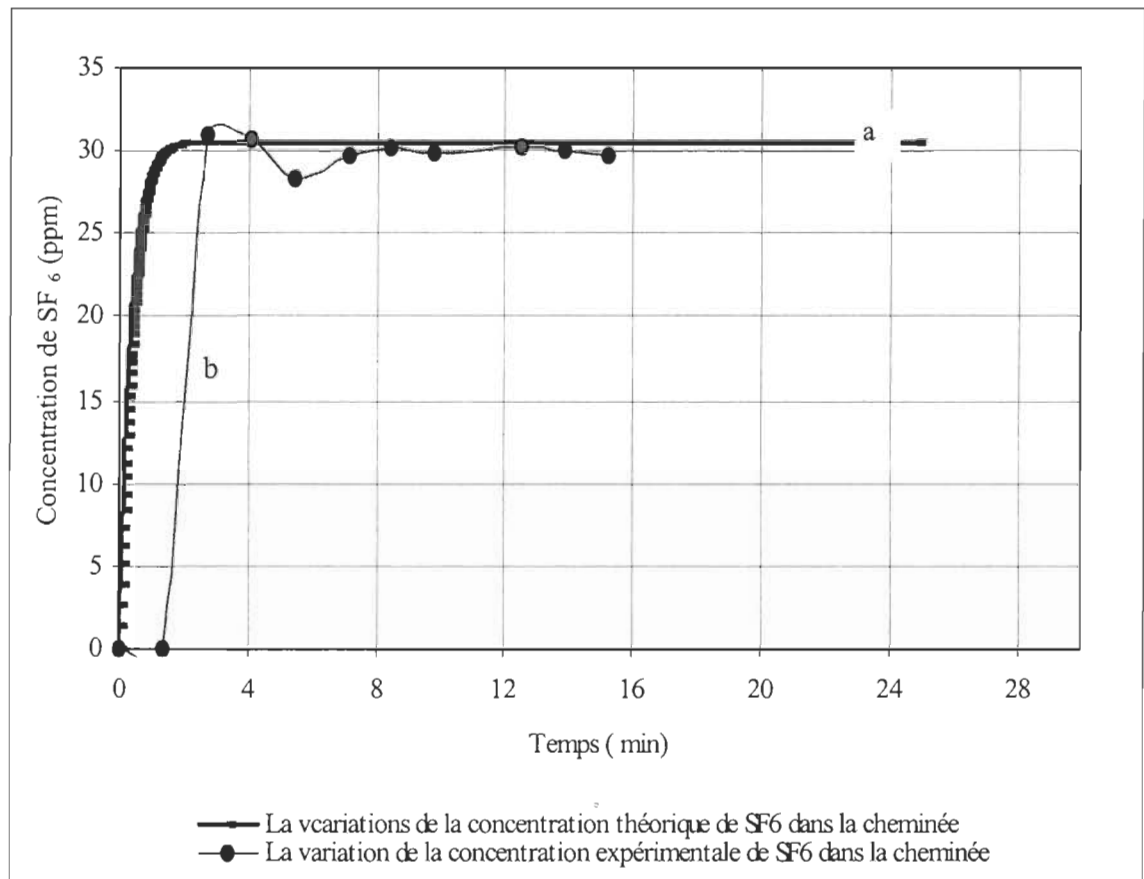
Les résultats du test du tableau 17 indiquent que la valeur de F calculée est de 13,3 et la valeur critique de F est de 4,1. La valeur du F calculée est supérieure à la valeur critique, ce qui signifie que statistiquement il y a une variabilité significative des concentrations de SF<sub>6</sub> d'un poste à un autre (H<sub>1</sub>), par conséquent l'hypothèse nulle est rejetée.

**3-4-3/ L'efficacité du système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B)**

Ce système de ventilation oblique avec alimentation d'air a un débit d'extraction moyenne égal à 269 m<sup>3</sup>/min, un débit d'alimentation moyenne égal à 297 m<sup>3</sup>/min et une pression statique moyenne avant les filtres égale à 149,2 Pa.

Au cours du test, le débit d'injection de SF<sub>6</sub> est 8,2 L/min. Les mesures des concentrations de SF<sub>6</sub> dans la cheminée lors de l'application de peinture ont été utilisées afin de déterminer l'efficacité de confinement du système de ventilation oblique avec alimentation d'air. La figure 16 (16a, 16b) présente les variations des concentrations théorique et expérimentale de SF<sub>6</sub> dans la cheminée lors d'une injection directe de SF<sub>6</sub> dans

le conduit d'évacuation. La valeur moyenne des concentrations expérimentales de  $\text{SF}_6$  est 29,93 ppm. Cette valeur de concentration correspond à une efficacité de confinement de 100 %. D'après l'équation (7), la concentration de l'équilibre théorique égale à 30,5 ppm avec un coefficient de mélange égal à 1 (voir Figure 16a).

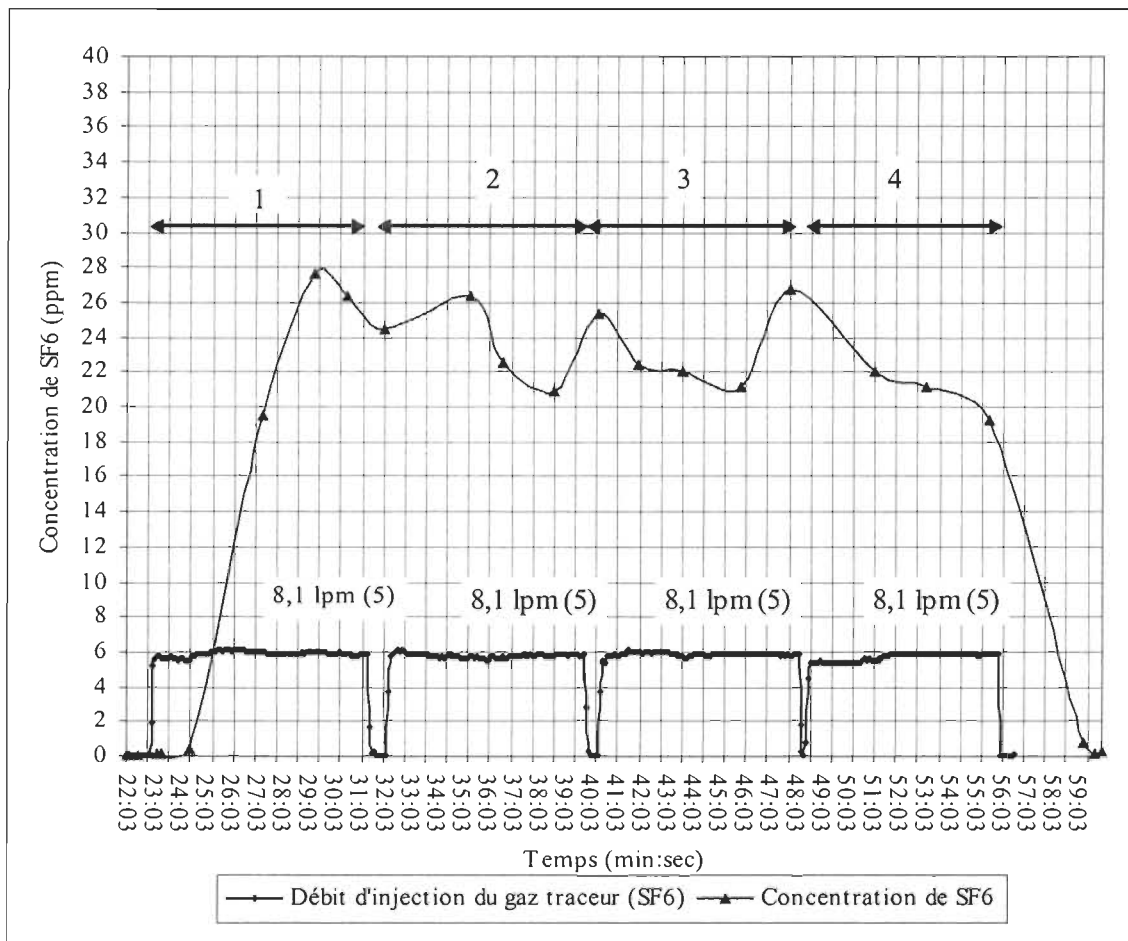


**Figure 16. Variations de la concentration expérimentale et théorique du  $\text{SF}_6$  dans la cheminée lors d'une injection directe dans les grilles d'extraction de (B)**

D'après l'équation (7), après 96 secondes, la concentration de  $\text{SF}_6$  lors d'une injection directe dans la cheminée devrait atteindre la concentration d'équilibre. Le temps

expérimental d'équilibre ne coïncide pas avec le temps théorique de l'équilibre. De même, d'après la figure 16, la concentration de l'équilibre théorique et la concentration de l'équilibre expérimental de  $\text{SF}_6$  dans la cheminée sont proches.

La figure 17, ci-dessous, présente la variation de la concentration de  $\text{SF}_6$  dans la cheminée lors de l'application de la peinture. Cette figure ne présente pas de fluctuations accentuées, la concentration de  $\text{SF}_6$  s'abaisse au moment où le peintre arrête la pulvérisation de la peinture pour remplir son pistolet. La durée de chaque arrêt, au cours du test, n'a pas dépassé une minute. La valeur de la concentration moyenne de  $\text{SF}_6$  dans le conduit d'évacuation lors de la pulvérisation de la peinture est de 23,46 partie par million (ppm) avec un écart-type de 2,6 (voir Annexe M). La valeur de la concentration moyenne de  $\text{SF}_6$  dans le conduit d'alimentation d'air au cours du test est de 32 parties par milliards (ppb) (voir Annexe L).



1, 2, 3 et 4 : Périodes d'injection de SF<sub>6</sub>, (5) : Débit d'injection du traceur (SF<sub>6</sub>).

**Figure 17. Variation de débit d'injection et de la concentration de SF<sub>6</sub> dans la cheminée lors de l'application de la peinture dans (B)**

Les résultats du calcul de l'efficacité de confinement de ce système de ventilation sont présentés dans le tableau 18.



Tableau 18

## L'efficacité du système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B)

Concentrations de SF <sub>6</sub> dans la cheminée au cours du test (ppm)	C (95 %) ppm	$\eta_C(95 \%) \%$
19,5	14,9	49,8
27,9	23,3	77,8
26,9	22,3	74,5
24,5	19,9	66,5
26,6	22	73,5
22,2	17,6	58,8
21	16,4	54,8
25,2	20,6	68,8
22,5	17,9	59,8
22	17,4	58,1
21,2	16,6	55,5
26,8	22,2	74,2
22	17,4	58,1
21,1	16,5	55,1
19,2	14,6	48,8

L'incertitude sur la valeur moyenne de C<sub>3</sub> (95 %) de SF<sub>6</sub> au cours du test est de 1,8, l'incertitude sur les résultats a été calculée suivant la méthode donnée en annexe A. De même, le coefficient de variation a été calculé afin de décrire la performance du système de ventilation. Le tableau 19 présente les paramètres d'évaluation de l'efficacité du système de ventilation oblique avec alimentation d'air.

Tableau 19

**Paramètres d'évaluation du système de ventilation oblique avec  
alimentation d'air (B)**

<b>(C<sub>3</sub>( 95 %) moyenne + ΔC<sub>3</sub>( 95 %)) ppm</b>	18,64 + 1,83
<b>η<sub>C</sub> (95 %) %</b>	62,27
<b>Coefficient de variation</b>	0.12
<b>Concentration moyenne (ppm)</b>	23,2

L'efficacité de captage du système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B) η<sub>C</sub> (95 %) % se situe à 62 % avec un coefficient de variation de 0,12. Ces résultats révèlent que l'efficacité du système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B) est faible. Ce résultat est en corrélation avec le résultat de l'échantillonnage dans les différents points d'échantillonnage à l'extérieur de l'aire de préparation.

### **3-5/ Système d'aspiration latérale sans air de compensation (C)**

Dans cette partie, les résultats de l'échantillonnage effectué dans l'aire de préparation à système d'aspiration latérale sans air de compensation ont été étudiés et traités statistiquement. Les variations des concentrations de SF<sub>6</sub> dans les différents points d'échantillonnage alentour de l'aire de préparation ont été étudiées et comparées entre elles, sachant qu'au cours de ce test, trois points d'échantillonnage supplémentaires ont été ajoutés. Les trois tuyaux des modules automatisés de prélèvement ont été placés dans trois différents points d'échantillonnage. Le premier est placé au-dessus du rideau, le deuxième est placé au plénum et le troisième est placé à l'intérieur de l'aire de préparation. Les

distributions des concentrations de SF<sub>6</sub> dans la cheminée ont été étudiées. L'efficacité du système d'aspiration latérale sans air de compensation (B) a été calculée.

### **3-5-1/ Distribution du SF<sub>6</sub> dans les différents points d'échantillonnage**

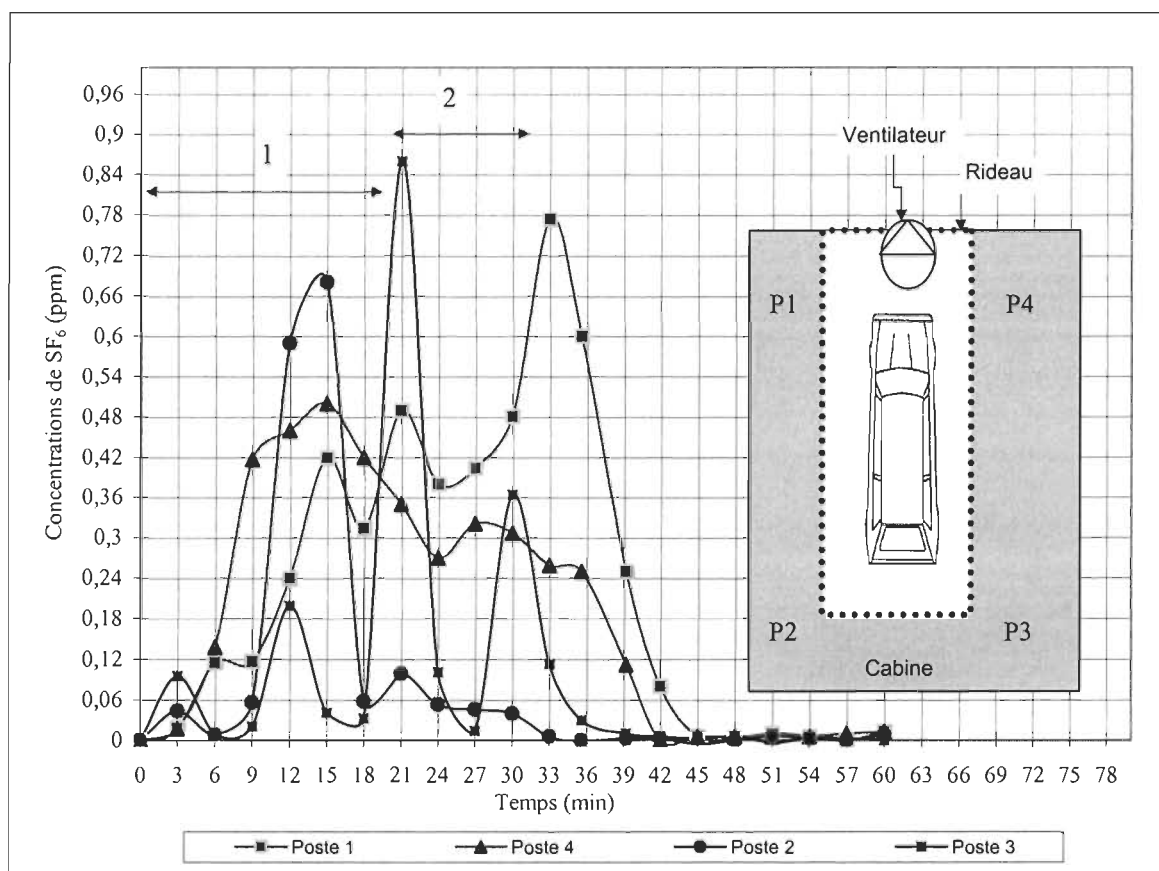
Afin d'utiliser les tests de comparaison adéquats, la distribution de ces concentrations pour chaque poste d'échantillonnage a été confirmée, et pour ce faire, le logiciel « A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures » a été utilisé. Le test de « W-Test » confirme avec une certitude de 95 % ( $P = 0,05$ ) que la distribution de concentration de SF<sub>6</sub> dans les différents points d'échantillonnage au cours du test est normale. Les variations de concentration de SF<sub>6</sub> dans le voisinage de l'aire de préparation (C) (points d'échantillonnage 1, 2, 3 et 4) sont présentées dans la figure 18.

L'écart-type de la distribution des concentrations de SF<sub>6</sub> pour le point d'échantillonnage 1 est égal à 2. D'après la figure 18, la concentration de SF<sub>6</sub> au point d'échantillonnage 1 augmente au fur et à mesure de l'application de la peinture. Cette augmentation de concentration de SF<sub>6</sub> au cours du test est marquée par une légère baisse de concentration lors d'un premier court arrêt d'application de peinture. Un deuxième arrêt de six minutes se manifeste par une remarquable baisse de concentration de SF<sub>6</sub> au point d'échantillonnage 1, sachant que le débit d'injection de SF<sub>6</sub> au cours du test est presque constant, excepté aux deux arrêts (voir Figure 20). La valeur de la concentration moyenne de SF<sub>6</sub> au point d'échantillonnage 1 est égale à 394 ppb avec un coefficient de variation égal à 0,19 (voir Annexe O).

Concernant le point d'échantillonnage 2, son coefficient de variation se situe à 0,24 et sa concentration moyenne de SF<sub>6</sub> est de 167 ppb (voir Annexe P). La concentration

moyenne de  $\text{SF}_6$  au point d'échantillonnage 3 est égale à 168 ppb, avec un coefficient de variation égal à 0,25 (voir Annexe Q). Pour le point d'échantillonnage 4, sa concentration moyenne de  $\text{SF}_6$  se situe à 336 ppb, son coefficient de variation est de 0,1 (voir Annexe R).

Les figures 18 et 20 et la cassette vidéo filmée lors de l'échantillonnage révèlent que les variations des concentrations de  $\text{SF}_6$  aux différents points d'échantillonnage et dans la cheminée dépendent de la position du peintre par rapport aux grilles d'extraction au cours d'échantillonnage.

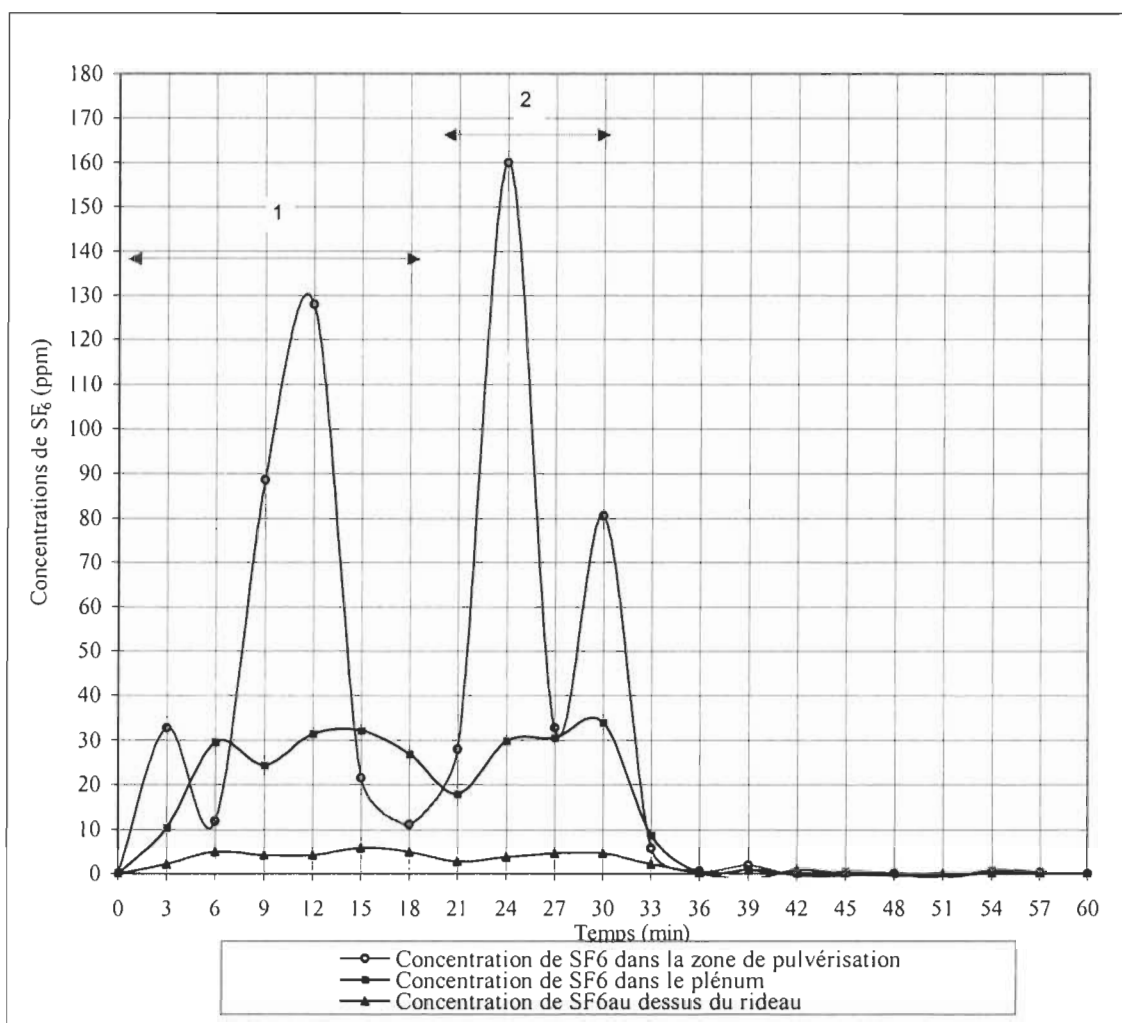


P1, P2, P3 et P4 : postes d'échantillonnage. 1 et 2 : Périodes d'injection.

**Figure 18. Variations de la concentration de  $\text{SF}_6$  dans le voisinage de l'aire de préparation (C)**

Les deux arrêts d'application de la peinture au cours de l'échantillonnage entraînent des baisses de concentrations de  $\text{SF}_6$  aux différents points d'échantillonnage et dans la cheminée. La première durée d'arrêt d'injection de  $\text{SF}_6$  est de trente secondes et la deuxième durée, de l'ordre de six minutes (voir Figure 20). Les concentrations de  $\text{SF}_6$  aux points d'échantillonnage 1, 2, 3 et 4 n'ont pas dépassé 1 ppm.

Spécialement pour cette aire de préparation, trois autres points d'échantillonnage supplémentaires de  $\text{SF}_6$  ont été ajoutés. La figure 19 présente les résultats d'échantillonnage de  $\text{SF}_6$  à l'intérieur de la zone de pulvérisation (point d'échantillonnage 5), dans le plénum (point d'échantillonnage 6) et au-dessus du rideau (point d'échantillonnage 7).



1 et 2 : Périodes d'injection du traceur (SF<sub>6</sub>).

**Figure 19. Variation de la concentration de SF<sub>6</sub> dans la zone de pulvérisation, au plénum et au-dessus du rideau de (C)**

D'après la figure 19, la concentration de SF<sub>6</sub> dans le point d'échantillonnage fixe à l'intérieur de la zone de pulvérisation n'est pas constante. Par contre, la concentration de SF<sub>6</sub> dans le plénum est presque constante. Les deux arrêts de pulvérisation de peinture à la 19<sup>ème</sup> et la 30<sup>ème</sup> minute entraînent une diminution de la concentration de SF<sub>6</sub> au plénum, à l'intérieur de la zone de pulvérisation et au-dessus du plénum. La figure 19 démontre la

présence du  $\text{SF}_6$  à des concentrations élevées dans le plénum lors du fonctionnement de l'aire de préparation sous mode d'évacuation.

### **3-5-2/ Comparaison des concentrations de $\text{SF}_6$ des différents points d'échantillonnage**

Afin de démontrer s'il y a une différence significative entre les concentrations des échantillons prélevés aux quatre points d'échantillonnage (1, 2, 3 et 4) dans le voisinage de l'aire de préparation (C), une comparaison a été faite entre les concentrations de  $\text{SF}_6$  des quatre points d'échantillonnage. Le test ANOVA unilatéral est appliqué. Le tableau 20 présente un rapport détaillé sur les données de base de ce test.

**Tableau 20**

#### **Les données de base des quatre points d'échantillonnage de (C)**

Groupes	Nombre d'échantillons	Somme	Moyenne	Variance
1	12	1,721	0,1434	0,05369
2	12	1,851	0,1542	0,06015
3	12	3,752	0,3126	0,05128
4	12	3,459	0,2882	0,02669

Le tableau 21 présente les résultats du test de ANOVA aux quatre points d'échantillonnage dans le voisinage de l'aire de préparation (C).

Tableau 21

**Résultats du test ANOVA effectué sur les quatre points d'échantillonnage de (B)**

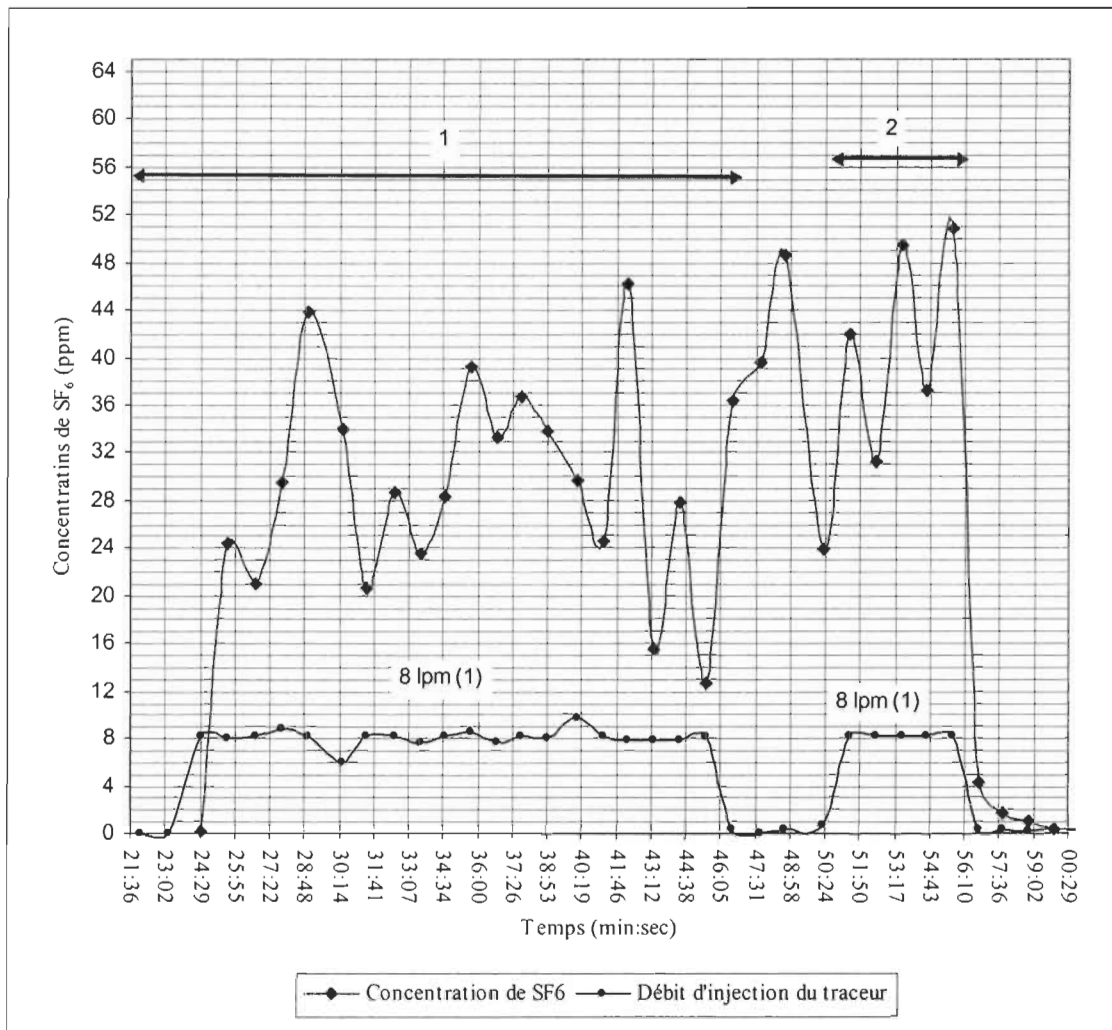
Source des variations	Degré de liberté	F calculé	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	3	1,94	0,13	2,81
A l'intérieur des groupes	44			
Total	47			

Pour ce tableau la valeur de F calculée est de 1,9 et la valeur critique de F pour un  $P < 0,05$  est de 2,8. La valeur du F calculée est inférieure à la valeur critique, ce qui signifie que statistiquement il n'y a pas de différence de concentrations entre les quatre points d'échantillonnages fixes au voisinage de l'aire de préparation, c'est-à-dire que la variabilité des résultats ne change pas d'un point d'échantillonnage à un autre.

**3-5-3/ L'efficacité du système d'aspiration latéral sans air de compensation (C)**

Comme pour la première et la deuxième aire de préparation, les mesures des concentrations de  $SF_6$  dans la cheminée sont utilisées pour déterminer l'efficacité de confinement expérimental du système d'aspiration latérale sans air de compensation (C). La figure 20 présente la variation de la concentration de  $SF_6$  dans la cheminée au cours d'échantillonnage. La durée du test est de 38 minutes avec un débit d'injection de 8 L/min de  $SF_6$ .





let 2 : Périodes d'injection du traceur, (1): Débits d'injection du traceur,

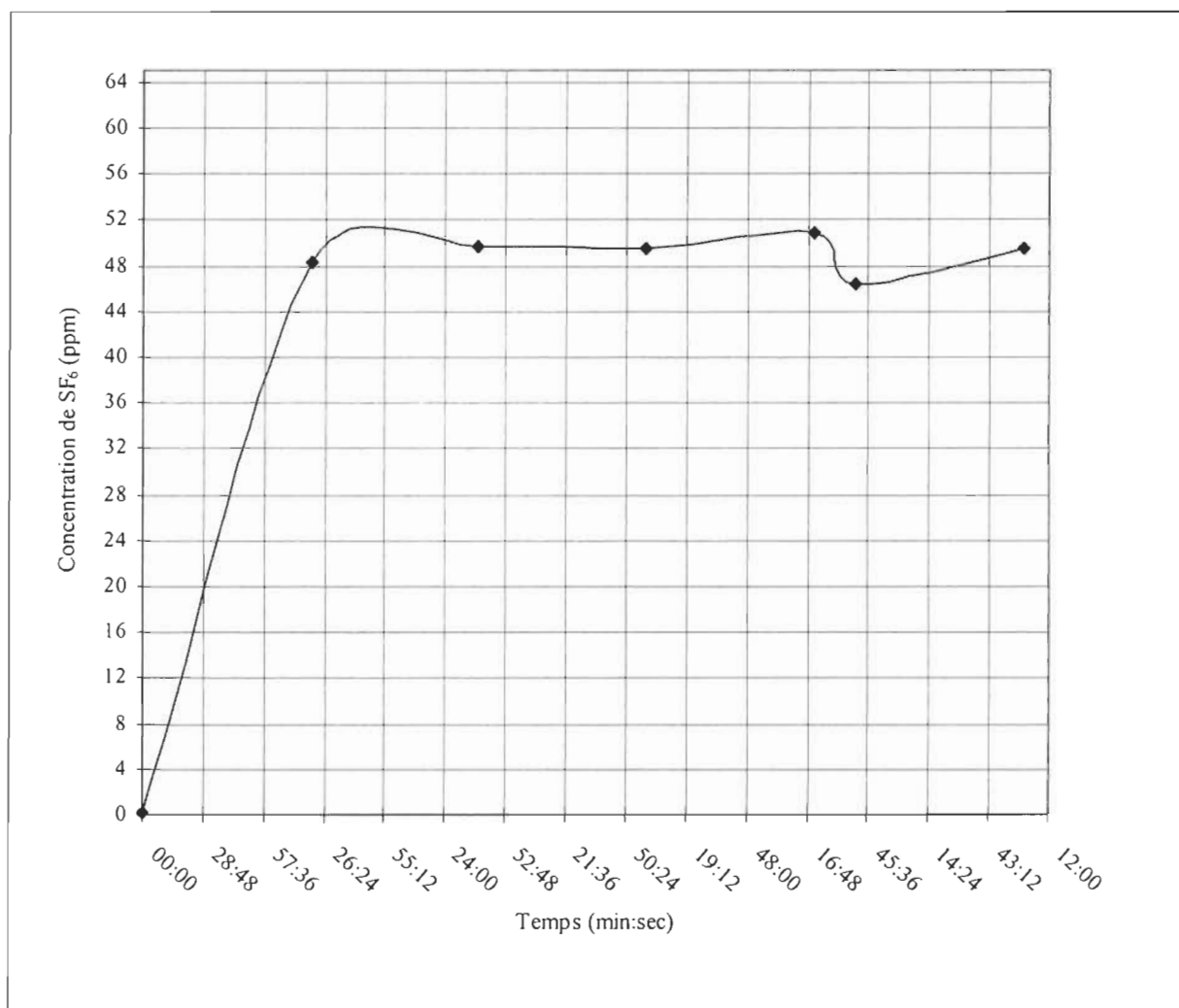
**Figure 20. Variations de débit d'injection et de la concentration de SF<sub>6</sub> dans la cheminée de (C)**

La valeur moyenne de la concentration de SF<sub>6</sub> dans la cheminée au cours du test est de 34,23 ppm avec un écart-type de 9 (voir Annexe S). Les valeurs des concentrations de SF<sub>6</sub> dans la cheminée qui correspondent au premier et au deuxième arrêt ont été rejetées lors de l'étude statistique. Le test de « W-Test » confirme avec une certitude de 95 % ( $P =$

0,05) que la distribution des concentrations de  $\text{SF}_6$  dans la cheminée au cours du test est log-normale.

D'après la figure 20, la concentration maximale de  $\text{SF}_6$  dans le conduit lors du test atteint 50,9 ppm. Cette valeur de concentration de  $\text{SF}_6$  est obtenue au moment où le peintre est placé devant les grilles d'extraction et, dès que le peintre s'éloigne, la concentration de  $\text{SF}_6$  dans la cheminée s'abaisse. Ce phénomène explique en partie la fluctuation de la concentration de  $\text{SF}_6$  dans la cheminée au cours de l'échantillonnage. Le phénomène de la fluctuation de la concentration de  $\text{SF}_6$  dans la cheminée est plus observable avec le système d'aspiration latérale sans air de compensation qu'avec les deux autres systèmes précédents de ventilation. De plus, il y a quelques fluctuations engendrées par les deux arrêts de l'application de la peinture au cours de l'échantillonnage. Ces chutes de la concentration coïncident plus au moins avec les arrêts d'injection de  $\text{SF}_6$ .

La valeur de la concentration moyenne de  $\text{SF}_6$  lors d'une injection directe de  $\text{SF}_6$  dans les grilles d'extraction est de 49 ppm. Cette valeur présente la concentration de  $\text{SF}_6$  dans la cheminée pour une efficacité de confinement de 100 % (voir Figure 21).



**Figure 21. Variation de la concentration de SF<sub>6</sub> dans la cheminée lors d'une injection directe dans les grilles d'extraction de (C)**

L'efficacité de confinement de ce système de ventilation a été calculée à partir des valeurs des concentrations de SF<sub>6</sub> dans la cheminée et les résultats sont présentés dans le tableau 22.

**Tableau 22**  
**L'efficacité de confinement du système d'aspiration latéral sans**  
**air de compensation**

<b>Concentrations de SF<sub>6</sub> dans la cheminée au cours du test (ppm)</b>	<b>C (95 %) ppm</b>	<b><math>\eta_C</math> (95 %) %</b>
24,4	6,14	12,5
21,0	2,74	5,58
29,5	11,2	22,9
43,8	25,5	52,1
33,9	15,6	31,9
20,7	2,44	4,97
28,6	10,3	21,1
23,5	5,24	10,7
28,4	10,1	20,7
39,2	20,9	42,7
33,2	14,9	30,5
36,6	18,3	37,4
33,7	15,4	31,5
29,6	11,3	23,1
24,6	6,34	12,9
46,2	27,9	57
36,3	18	36,8
39,5	21,2	43,3
48,7	30,4	62,1
23,8	5,54	11,3
42	23,7	48,4
31,2	12,9	26,4
49,4	31,1	63,5
37,2	18,9	38,6
50,9	32,6	66,6

L'incertitude sur la valeur moyenne de  $C_3$  (95 %) de  $SF_6$  au cours du test est de 4,4, l'incertitude sur les résultats a été calculée suivant la méthode donnée en annexe A. De même, le coefficient de variation a été calculé afin de décrire la performance du système de ventilation. Le tableau 23 présente les paramètres d'évaluation de l'efficacité du système de ventilation d'aspiration latéral sans air de compensation (C).

**Tableau 23**

**Paramètres d'évaluation de l'efficacité du système  
d'aspiration latéral sans air de compensation (C)**

<b>(<math>C_3</math>( 95 %) moyenne + <math>\Delta C_3</math>( 95 %)) ppm</b>	18,74 + 4,43
<b><math>\eta_C</math> (95 %) %</b>	38,24
<b>Coefficient de variation</b>	0,26
<b>Concentration moyenne (ppm)</b>	34,2

L'efficacité de captage du système d'aspiration latéral sans air de compensation (C)  $\eta_C$  (95 %) % se situe à 38 % avec un coefficient de variation de 0,26. Cette résultat révèle que l'efficacité du système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B) est faible. Ce résultat est en corrélation avec le résultat de l'échantillonnage dans les différents points d'échantillonnage à l'extérieur de l'aire de préparation (C).

**3-6/ Concentrations des isocyanates (HDI) et des solvants de peinture au cours d'échantillonnage**

Les isocyanates se présentaient essentiellement sous deux formes, soit monomère gazeux, soit oligomère aérosol, cette dernière forme étant prédominante. Les concentrations moyennes d'hexaméthylène diisocyanate monomères et oligomères ont été mesurées aux

différents points d'échantillonnage fixes pour chaque aire de préparation. De même, les concentrations moyennes d'acétate de butyle normal, d'acétate d'éthyle, d'éthylbenzène, toluène et le xylène (isomères o.m.p) ont été mesurées aux quatre coins des aires de préparation. Les résultats des échantillonnages des isocyanates et les solvants de peinture sont rapportés au tableau 24.

La température dans les aires de préparation était influencée par celle à l'extérieur et a varié entre 20 et 30 °C. Les taux d'humidité ne pouvaient être ajustés et ont varié entre 20 et 55 %, la majorité des mesures se situant dans l'ordre de 30 %. Aucune correction n'a été apportée aux concentrations des isocyanates ni aux concentrations de solvants de peinture en fonction des taux d'humidité ou de la température ambiante.

**Tableau 24**  
**Concentrations des isocyanates (HDI) et des solvants de peinture dans**  
**les trois aires de préparation**

Cabine	Contaminants	(VEMP) <sup>1</sup> (mg/m <sup>3</sup> )	Concentrations aux postes d'échantillonnages (mg/m <sup>3</sup> )						Concentrations en zone respiratoire (mg/m <sup>3</sup> )
			1	2	3	4	5	6	Peintre
(A)	HDI(monomères)	0,34 (EM, S) <sup>2</sup>	0,0007	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
	HDI (oligomères)	?	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
	Acétate de butyle	532	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	
	Acétate d'éthyle	1440	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	
	Éthylbenzene	434	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	
	Toluène	188	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	
	Xylène	434	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	
(B)	HDI (monomères)	0,34 (EM, S) <sup>2</sup>	N.E	0,0004	0,0004	N.E	0,0007	0,0007	0,0007
	HDI (oligomères)	?	N.E	0,0006	0,0006	N.E	0,04	0,0012	0,015
	Acétate de butyle normal	532	N.E	N.D	N.D	N.E	9	N.D	
	Acétate d'éthyle	1440	N.E	9	9	N.E	10	N.D	
	Éthylbenzene	434	N.E	6	8	N.E	10	N.D	
	Toluène	188	N.E	N.D	N.D	N.E	N.D	N.D	
	Xylène	434	N.E	30	35	N.E	50	N.D	
(C)	HDI (monomères)	0,34 (EM, S) <sup>2</sup>	N.E	0,0004	0,0008	N.E	0,0013	0,0034	0,003
	HDI (oligomères)	?	N.E	0,0006	0,0006	N.E	0,0009	0,16	0,138
	Acétate de butyle	532	N.E	15	15	N.E	4	15	
	d'acétate d'éthyle	1440	N.E	15	4	N.E	4	15	
	Éthylbenzene	434	N.E	15	2	N.E	2	15	
	Toluène	188	N.E	6	5	N.E	7	6	
	Xylène	434	N.E	70	2	N.E	10	70	

Abréviations standard : N.D = Non décelé, N.E = Non effectué.

(1): Règlement sur la santé et la sécurité du travail, Décret 885-2001, Gouvernement du Québec.

(2): EM – substance dont l'exposition doit être réduite au minimum, S – sensibilisant.

VEMP : Valeur d'exposition moyenne pondérée.

D'après le tableau 24, dans la première aire de préparation (A), les concentrations des isocyanates dans les différents points d'échantillonnage fixes et même dans la zone respiratoire ont été inférieures à la limite de détection de la méthode d'échantillonnage de l'IRSST pour les isocyanates. De même, dans l'aire de préparation (B), les concentrations des isocyanates dans les différents points d'échantillonnage ont été inférieures à la limite de détection de la méthode (ISO-CHEK<sup>R</sup>). Ainsi, la concentration des isocyanates dans la zone respiratoire du peintre était de 0,4 g/m<sup>3</sup>. De même, à aucun point de l'échantillonnage les concentrations des solvants de peintures n'ont dépassé leur VEMP.

Pour la troisième aire de préparation (C), des concentrations assez élevées des isocyanates dans les différents points d'échantillonnage et dans la zone respiratoire du peintre ont été mesurées.

D'après les résultats d'échantillonnage des isocyanates par la méthode ISO-CHEK<sup>R</sup>, les travailleurs des trois différentes aires de préparation ne sont pas surexposés. La concentration moyenne des isocyanates sous forme de monomères et oligomères dans les trois aires de préparation n'a jamais dépassé la VEMP pour les isocyanates. Les concentrations des solvants de peinture aux différents points d'échantillonnage fixes ont été plus élevées que celles mesurées au voisinage de l'aire de préparation (B).

Le calcul du facteur  $R_m$  (somme des fractions du mélange) des solvants de peinture a été fait pour un mélange de substances (tolyène, acétate d'éthyle, éthylbenzene, acétate de butyle normal et le xylène) ayant des effets similaires sur les mêmes organes cibles. En effet, la quasi-totalité des solvants de peinture provoque l'irritation des voies respiratoires supérieures, l'atteinte du système nerveux central et l'irritation des yeux (voir tableau 25).



**Tableau 25**

**R<sub>m</sub> des solvants de peinture dans chaque aire de préparation**

	Cabine 1						Cabine 2						Cabine 3					
	Postes						Postes						Postes					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
<b>R<sub>m</sub></b>	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	9 10 <sup>-3</sup>	0,1	N.E	0,16	N.E	N.E	0,26	6,5 10 <sup>-2</sup>	N.E	7,4 10 <sup>-2</sup>	0,26

Abbreviations standard : N.E = Non effectué, R<sub>m</sub> : somme des fractions du mélange.

Les résultats du tableau 25 démontrent que toutes les valeurs du R<sub>m</sub> aux différents points d'échantillonnage fixes dans les trois aires de préparation n'ont pas dépassé l'unité.

## CHAPITRE IV

### DISCUSSION

La technologie des aires de préparation est apparue récemment pour les applications de peinture hors cabine. L'utilisation de la peinture à base d'isocyanate pouvant présenter de graves dangers pour la santé des travailleurs, il importe d'évaluer l'impact de cette technologie sur les risques pour la santé. Les trois aires de préparation soumises à l'étude sont respectivement équipées d'un système de ventilation dont les caractéristiques diffèrent, il s'agit soit (1) d'un système d'aspiration au plancher avec alimentation générale d'air dans le local (A), soit (2) d'un système de ventilation oblique avec alimentation air (B), soit enfin, (3) d'un système d'aspiration latéral sans air de compensation (C). Leur performance respective n'a pas fait l'objet d'étude antérieure.

La présente étude a pour objectif de mettre au point des méthodes permettant d'évaluer l'efficacité de ces équipements. Les deux méthodes utilisées pour vérifier l'efficacité de chaque système de ventilation sont : la méthode par traçage au SF<sub>6</sub> et la méthode ISO-CHEK<sup>R</sup>. Les méthodes de prélèvement et d'analyse utilisées dans cette étude sont celles de l'IRSST.

Les concentrations moyennes de SF<sub>6</sub>, d'isocyanates, de solvants et les paramètres aérauliques ont varié d'une aire de préparation à l'autre. La concentration de SF<sub>6</sub> dans les échantillons d'air (bruit de fond), pris dans les différentes aires de préparation avant chaque test, se situait entre 538 ppt et 676 ppt. La concentration de bruit de fond sert comme

indicateur des concentrations présentes dans les aires de préparation. Une comparaison des concentrations intérieures et alentour de l'aire de préparation a été réalisée avec les données obtenues. Les concentrations intérieures de SF<sub>6</sub>, d'isocyanates et des solvants de peinture sont toujours supérieures aux concentrations mesurées dans l'air alentour de l'aire de préparation. Les concentrations des isocyanates à l'intérieur des aires de préparation démontrent le risque de la surexposition du peintre si ce dernier ne porte pas un masque à adduction d'air. Cette surexposition potentielle est confirmée par la corrélation entre la variation des concentrations des différents contaminants échantillonnés à l'intérieur des aires de préparation. C'est-à-dire les concentrations élevées de SF<sub>6</sub> à l'intérieur des aires de préparation sont accompagnées par des concentrations élevées d'isocyanates et de solvants de peinture. Une concentration élevée de SF<sub>6</sub> à l'extérieur de l'aire de préparation peut être accompagnée par une concentration élevée de solvants, mais pas nécessairement par une concentration élevée d'isocyanates.

L'observation des données brutes de cette étude permet de constater qu'il existe une grande variation dans les concentrations de SF<sub>6</sub> mesurées à l'extérieur des différentes aires de préparation. De même, cette variation de SF<sub>6</sub> peut dépendre de la localisation du point d'échantillonnage.

Une faible variation de concentrations de SF<sub>6</sub> a été obtenue dans la cheminée lorsqu'on ne tenait pas compte des concentrations de SF<sub>6</sub> lors des arrêts et ce pour les trois cabines. La concentration moyenne de SF<sub>6</sub> retrouvée dans la cheminée pour la durée des prélèvements, soit environ trente minutes dans la présente étude, permet de déterminer l'efficacité de captage minimale dans la zone de pulvérisation pour les trois aires de préparation.

Les résultats d'échantillonnage du gaz traceur au voisinage des trois différentes aires de préparation révèlent la présence de SF<sub>6</sub>. Une comparaison des concentrations de SF<sub>6</sub> au voisinage des aires de préparation, avant et au cours de l'échantillonnage, permet de constater que celles-ci sont toujours supérieures lors de l'échantillonnage. Cette observation confirme que le traceur injecté dans l'air comprimé n'a pas été confiné totalement dans la zone de pulvérisation. Une seconde constatation apportée grâce aux analyses comparatives des concentrations de SF<sub>6</sub> entre les différents points d'échantillonnage est que la concentration de SF<sub>6</sub> au voisinage des aires de préparation dépend de la localisation du point d'échantillonnage et de la conception du système de ventilation.

L'analyse de variance des concentrations de SF<sub>6</sub> mesurées au voisinage de chaque aire de préparation à chaque point d'échantillonnage a été effectuée à l'aide du test ANOVA. Cette analyse démontre que les concentrations de SF<sub>6</sub> rencontrées dans les points d'échantillonnage P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub>, au voisinage du système d'aspiration au plancher avec compensation d'air dans le local (A), ont une variabilité significative par rapport à celle du point d'échantillonnage P<sub>1</sub>. D'après la figure 12, les concentrations de SF<sub>6</sub> aux différents points d'échantillonnage varient en fonction de la position du peintre par rapport à la fosse d'évacuation lors de l'application de la peinture.

Les résultats d'échantillonnage par la méthode ISO-CHEK<sup>R</sup> au voisinage du système d'aspiration au plancher avec alimentation d'air dans le local (A) révèlent que toutes les concentrations d'isocyanates sont inférieures à la valeur minimum rapportée (VMR). Mais ces résultats n'écartent pas la possibilité de présence d'isocyanates à l'extérieur de la zone de pulvérisation en quantités inférieures à la limite de détection de la méthode d'échantillonnage de l'IRSST (ISO-CHEK<sup>R</sup>).

L'analyse statistique des concentrations de  $\text{SF}_6$  dans la cheminée lors de l'échantillonnage pour le système d'aspiration au plancher avec alimentation d'air dans le local (A) (voir tableau 9) démontre que l'efficacité de captage  $\eta_C$  (95 %) se situe à 55 % avec un coefficient de variation de 0,15. Cette faible valeur de coefficient de variation démontre l'homogénéité de la concentration de  $\text{SF}_6$  dans la cheminée. Ainsi, la valeur faible de l'efficacité de captage  $\eta_C$  (95 %) démontre que le système d'aspiration au plancher avec alimentation d'air dans le local (A) ne réussit pas à confiner les contaminants à l'intérieur de la zone de pulvérisation, par contre, selon les résultats de la méthode ISO-CHEK<sup>R</sup>, l'aire de préparation (A) est efficace.

Les faibles concentrations de  $\text{SF}_6$  détectées au voisinage du système d'aspiration au plancher (A) sont dues en partie à l'étanchéité partielle du volet du plafond soufflant et du rideau qui couvre partiellement le périmètre de l'aire de préparation. L'étanchéité partielle du volet du plafond soufflant a provoqué la recirculation des contaminants dans l'aire de préparation et à l'extérieur. De même, l'étanchéité partielle du rideau (espace entre le rideau et le sol) facilite la fuite des contaminants à l'extérieur de la zone de pulvérisation. La présence de  $\text{SF}_6$  à des concentrations variables à l'extérieur de la zone de pulvérisation du système d'aspiration au plancher avec alimentation d'air dans le local (A) peut être expliquée par l'absence d'un captage uniforme sur toute la surface aspirante. Ceci pourrait être corrigé par l'ajout d'une unité de compensation d'air neuf pour l'aire de préparation (A).

Au voisinage du système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B), les concentrations de SF<sub>6</sub> mesurées lors de l'échantillonnage sont très élevées. L'analyse de variance des concentrations de SF<sub>6</sub> mesurées dans les différents points d'échantillonnage au voisinage du système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B) démontre que les concentrations de SF<sub>6</sub> rencontrées dans les points d'échantillonnage P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub> ont une variabilité significative par rapport à celle du point d'échantillonnage P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub>. Les concentrations mesurées de SF<sub>6</sub> dans les points P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub> sont très élevées par rapport aux autres points d'échantillonnage. Il y a donc une accumulation de SF<sub>6</sub> aux points d'échantillonnage P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>. Ces concentrations de SF<sub>6</sub> sont 160 fois supérieures à celles mesurées au voisinage de l'aire de préparation équipée du système d'aspiration au plancher avec alimentation d'air dans le local (A). Ces concentrations élevées de SF<sub>6</sub> dans les points d'échantillonnage peuvent être dues en partie à l'espace fermé où se situent P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub> et, en général, à la sur-pressurisation de l'aire de préparation. La façon dont le système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B) est utilisé entraîne une situation qui ne favorise pas la protection des travailleurs à l'extérieur de la zone de pulvérisation. Par souci de qualité du produit, le propriétaire tend à sur-pressuriser l'aire de préparation. Cela permet, en outre, de travailler dans une atmosphère hors poussière. Cette pratique diminuera l'efficacité du système de ventilation oblique avec alimentation d'air pour confiner les contaminants dans la zone de pulvérisation (phénomène de piston).

L'analyse statistique des concentrations de  $\text{SF}_6$  dans la cheminée lors de l'échantillonnage (voir tableau 19) démontre que l'efficacité de captage  $\eta_c$  (95 %) du système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B) se situe à 62 % avec un coefficient de variation de 0,12. Les résultats de cette analyse révèlent que l'efficacité du système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B) est en relation inverse à celle observée précédemment (cabine A), c'est-à-dire que les concentrations de  $\text{SF}_6$  et de solvants de peinture au voisinage de l'aire de préparation (B) sont plus élevées. En effet, les concentrations de  $\text{SF}_6$  retrouvées au voisinage de l'aire de préparation (B) soumise à une pression positive (causée par un  $Q$  d'alimentation  $>$   $Q$  d'évacuation) sont généralement plus élevées que celles retrouvées au voisinage de l'aire de préparation (A) soumise à une pression négative. Une explication possible serait qu'il y a un phénomène de piston qui se crée dans l'aire de préparation (B) soumise à une pression positive. Une vérification de cette hypothèse pourrait être réalisée en refaisant l'échantillonnage avec un débit d'alimentation inférieur au débit d'extraction (aire de préparation soumise à une pression négative). En effet, les concentrations de  $\text{SF}_6$  mesurées lors de l'échantillonnage au voisinage de l'aire de préparation équipée par un système de ventilation oblique (B), soumise à une pression positive, sont supérieures aux concentrations de  $\text{SF}_6$  retrouvées au voisinage des aires de préparation équipées par un système de ventilation semi-oblique (C) ou par un système d'aspiration au plancher avec alimentation d'air dans le local (A). Une concentration de  $\text{SF}_6$  plus faible au voisinage de l'aire de préparation à système de ventilation oblique (B) pourrait être obtenue si l'aire de préparation était dépressurisée. Cette étude démontre que, dans le cas d'un système de ventilation oblique (B) soumise à une pression positive, les concentrations des

contaminants à l'extérieur sont supérieures aux concentrations auxquelles on pourrait s'attendre considérant que, théoriquement, le système de ventilation oblique (B) est plus efficace qu'un système d'aspiration au plancher sans apport d'air dans la zone de pulvérisation (A) ou qu'un système semi-oblique (C).

Les résultats révèlent qu'il n'y a pas d'isocyanates au voisinage d'un système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B) lors de l'application de la peinture. Mais ces résultats n'écartent pas la possibilité de présence des isocyanates à l'extérieur de la zone de pulvérisation en quantités inférieures à la limite de détection de la méthode d'échantillonnage de l'IRSST (ISO-CHEK<sup>R</sup>). Cette étude démontre que les concentrations des solvants de peinture rencontrées au voisinage d'un système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B) sont presque égales à celles retrouvées dans la zone de pulvérisation. Ceci révèle que le système de ventilation oblique avec alimentation d'air n'est pas efficace pour confiner les solvants de peinture et le SF<sub>6</sub> à l'intérieur de la zone de pulvérisation. La valeur de l'efficacité du système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B) qui a été déterminée par la méthode de gaz traceur est valable seulement dans la zone de pulvérisation et par conséquent ne tient pas compte des fuites dues à la sur-pressurisation. De telles constatations soulèvent un problème au niveau de ce système qui ne réussit pas à remplir son rôle de confinement des contaminants. Par conséquent, une amélioration du système devra être effectuée pour maximaliser son efficacité. Pour assurer le bon fonctionnement de ce système de ventilation (B), il faut que le débit d'extraction soit supérieur au débit d'alimentation.



Les résultats d'échantillonnage au voisinage d'un système d'aspiration latérale sans air de compensation (C) révèlent qu'il y a du SF<sub>6</sub>, des isocyanates et des solvants de peinture dans les différents points d'échantillonnage. L'analyse de variance des concentrations de SF<sub>6</sub> mesurées dans les différents points d'échantillonnage au voisinage d'un système d'aspiration latérale sans air de compensation (C) démontre que les concentrations de SF<sub>6</sub> rencontrées dans les points d'échantillonnage P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub> n'ont pas une variabilité significative entre eux. Les concentrations de SF<sub>6</sub> sont 170 fois inférieures à celles mesurées au voisinage d'un système de ventilation oblique avec alimentation d'air (B). Les résultats révèlent qu'il y a des isocyanates au voisinage d'un système d'aspiration latérale sans air de compensation (C) lors de l'application de la peinture. Mais, par contre, il n'y a pas des solvants de peinture au voisinage du système (C) lors de l'échantillonnage. Cette étude démontre que les concentrations des isocyanates rencontrées au voisinage de ce système (C) sont du même ordre de grandeur que celles retrouvées dans la zone de pulvérisation.

Les résultats d'échantillonnage des solvants de peinture et des isocyanates à l'intérieur de la zone de pulvérisation (P<sub>5</sub>, P<sub>6</sub>) révèlent que les concentrations des isocyanates et des solvants de peinture dans P<sub>5</sub> sont supérieures à celles rencontrées dans P<sub>6</sub>. Ceci prouve que la répartition de l'air dans la zone de pulvérisation n'est pas homogène bien qu'elle soit à l'équilibre. L'analyse statistique des concentrations de SF<sub>6</sub> dans la cheminée lors de l'échantillonnage (voir tableau 23) démontre que l'efficacité de captage  $\eta_C$  (95 %) du

système d'aspiration latérale sans air de compensation (C) se situe à 38 % avec un coefficient de variation de 0,26.

Ces résultats démontrent que le système d'aspiration latérale sans air de compensation (C) n'est pas efficace pour confiner les contaminants à l'intérieur de la zone de pulvérisation.

La présente étude permet d'apporter des explications sur l'inefficacité du système (C) à confiner les contaminants. Les concentrations de SF<sub>6</sub>, d'isocyanates et de solvants de peinture, retrouvées au voisinage du système d'aspiration latérale sans air de compensation (C), sont dues principalement aux deux facteurs suivants :

- L'étanchéité partielle du volet du plafond soufflant a provoqué la recirculation des contaminants dans l'aire de préparation (C).
- L'absence d'un captage uniforme sur toute la surface aspirante (plénum non pressurisé) a entraîné la fuite des contaminants vers l'extérieur de la zone de pulvérisation.

De telles constatations soulèvent un problème au niveau de ce système qui ne réussit pas à confiner les contaminants. Par conséquent, une amélioration du système (C) devra être effectuée pour optimiser son efficacité. Afin de corriger le problème d'apport d'air de ce système d'aspiration latérale sans air de compensation (C), les fabricants devront installer un système de compensation qui introduit un flux homogène d'air neuf par le plénum en décalage volumétrique pour dépressuriser la pièce (Pression statique de plénum > pression statique d'évacuation). De plus, il faudra s'assurer de la bonne étanchéité du volet de plénum afin d'éviter la recirculation des contaminants.

Afin d'éviter le phénomène de sur-pressurisation, les filtres de tous les différents types d'aires de préparation devraient être remplacés périodiquement, ainsi que le recommandent les fabricants. En effet, pour connaître l'état d'encrassement des filtres, il faut installer un appareil de contrôle permettant de déterminer le moment où l'on doit changer le filtre pour respecter les conditions de ventilation minimales des aires de préparation.

L'étude a montré la pertinence du paramètre efficacité de captage pour une évaluation directe des performances et l'intérêt de la technique de traçage pour son mesurage. La technique de mesurage par traçage à  $\text{SF}_6$  de l'efficacité de captage s'est révélée un outil fiable pour l'évaluation des performances dans la zone de pulvérisation des divers types d'aires de préparation. Au cours de cette étude, des limitations ont cependant pu être mises en évidence. Ces limitations sont dues à la méthodologie suivie pour la localisation des points d'échantillonnage de  $\text{SF}_6$  et à l'appareil utilisé au cours de cette étude. Il aurait été souhaitable de placer des modules automatisés de prélèvement en nombre suffisant à l'intérieur des aires de préparation afin de déterminer la concentration du traceur et d'étudier sa dispersion à l'intérieur de l'aire de préparation (la concentration du  $\text{SF}_6$  a été mesurée seulement à l'intérieur de l'aire de préparation (C)). En effet, le pourcentage de fuite du traceur à l'extérieur de l'aire de préparation aurait pu être déterminé à partir de la concentration du traceur à l'intérieur et à l'extérieur de l'aire de préparation. Ainsi, une sonde de prélèvement multiple aurait pu être utilisée pour les prélèvements de traceur qui ont été effectués dans la cheminée afin d'éviter le phénomène de stratification que nous avons rencontré dans certains cas de mesures. De même, il aurait été souhaitable d'utiliser un appareil d'échantillonnage autre que le B&K avec un temps de prélèvement inférieur au

temps de prélèvement de celui-ci, surtout lorsque la durée du test est courte (30 minutes d'échantillonnage).

### **CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS**

Les retombées de cette étude sont nombreuses. Cette étude a démontré la validité et la pertinence de la méthode par traçage pour l'évaluation de l'efficacité du système de ventilation. Cette étude démontre que la technique de traçage permet d'obtenir, comparativement à l'échantillonnage des contaminants, une évaluation plus détaillée du potentiel de confinement des aires de préparation. Grâce à la sensibilité de la méthode par traçage, cette étude démontre que les systèmes de ventilation testés ne permettent pas de capter la totalité des polluants, surtout lorsque le système de ventilation est sur-pressurisé. Des améliorations doivent être envisagées pour maximaliser l'efficacité de ces aires de préparation.

Pour améliorer l'efficacité des systèmes de ventilation des aires de préparation, les fabricants devraient :

- Installer une unité de compensation d'air neuf pour l'aire de préparation afin d'assurer un soufflage d'air dirigé de façon à entraîner les polluants vers l'ouverture aspirante sans les disperser dans tout l'atelier {aires de préparation (A) et (C)};
- S'assurer que le débit d'extraction est supérieur au débit de l'alimentation;
- S'assurer de l'étanchéité entière du rideau;
- S'assurer de la bonne étanchéité du volet.

De même, il est suggéré que toutes les personnes qui travaillent dans le voisinage de l'aire de préparation devraient porter des masques de protection respiratoire individuelle permettant de se protéger de façon pratique et efficace. Cette protection devra être utilisée même dans les environnements considérés comme ne présentant aucun risque.

L'ensemble de ces recommandations favorisera l'utilisation adéquate performante des aires de préparation tout en assurant au peintre et aux personnes dans le voisinage de celles-ci une protection adéquate contre les isocyanates et les solvants de peinture.

La méthode par traçage ouvre également des perspectives intéressantes en matière de recherche. Il est désormais possible d'envisager des études expérimentales ou théoriques (Modèles numériques ou par la simple étude du temps de relaxation et de la vitesse de sédimentation des aérosols) pour trouver une corrélation mathématique entre le coefficient de transport du gaz traceur ( $\text{SF}_6$ ) et celle de l'isocyanate.

## RÉFÉRENCES

Association française de normalisation (afnor), norme française, « Air des lieux de travail : Mesurage de l'efficacité de captage et contrôle différentiel d'un système d'assainissement », éditée et diffusée par l'Association Française de normalisation (AFNOR), NF X 43-260, Octobre 1987.

Bémer D., Muller. J.P., « Comparaison des efficacités de captage mesurées par traçages gazeux et particulaire », Service Thermique-ventilation, Centre de recherche de l'INRS, Nancy, ND 2066-169-97, Paris, France, 1987.

Bémer D., Muller. J.P., & Aubertin, G., « Traçage à l'hélium : Mise au point d'une méthode de mesure du débit d'émission d'une source gazeuse », Service Thermique-Ventilation, Centre de recherche de l'INRS, Nancy, ND 2007-161-95, Paris, France, 1995.

Bémer D., Dessagne, J.M., & Aubertin, G., « Emission measure flow of a source : development of a method using a helium gas tracer ». American Industrial Hygiene Association, Vol. 60, pp. 354-362, 1999.

Breum, N.O., « Occupant generated CO<sub>2</sub> as a tracer gas in a field study of ventilation rate », Air Infiltration Review, pp. 4-7, November 1987.

Breum, N.O., « Air exchange efficiency of displacement ventilation in a printing plant », Annals of Occupational hygiene, 32, 481-488, 1988.

Breum, N.O., « A comparaison in measurement of local and room mean age of air ». Air Infiltration review, 1992.

Charlesworth, P.S., « Measurement techniques for ventilation and air leakage ». In: Proceedings of the 8<sup>th</sup> AIVC Conference, Uberlingen, Germany, 1987.

Comité Européen de Normalisation (CEN), « Efficacité de captage d'un système d'aspiration – Méthode par traçage », éditée et diffusée par l'Association Française de normalisation (AFNOR), NF en 1093-4, Mars 1996.

CSST, « Qualité de l'air en milieu industriel », Guide de ventilation, Montréal, DC 400-1380, 1998.

Cornu, J., & J. Leleu, « Étude d'une cabine de peinture fermée », Centre de recherche de l'INRS, ND1450-113, Paris, France, 1983.

Cornu, J., Muller, J., & Guélin, C., « Méthode de mesure de l'efficacité de captage : Etude de paramètres d'influence », Service Thermique-Ventilation, centre de recherche de l'INRS, Nancy, ND 1852-145-91, Paris, France, 1991.

Delfosse, M., & Laureillard, J., « Cabines de peinture dans la carrosserie automobile : Dosage des isocyanates et des solvants conformité des cabines ». Cahiers de notes documentaires de l'INRS, ND 1766-138-90, France, 1990.

Dietz, R.N., Goodrich, R.W., Cote, E.A., & Wieser, R.F., « Detailed description and performance of a passive perfluorocarbon tracer system for building ventilation and air exchange measurements ». In : Treshsel, H. R. and Largus, P. L. (eds) Measured air leakage of buildings, 203-264. ASTM STP 904. Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1986.

Fisk, W.J., Prill, R.J., & Seppanen, O., « Commercial building ventilation measurements using multiple tracer gases ». In: Proceedings of the 9<sup>th</sup> AIVC Conference, Gent, Belgium, 1988.

Fisk, W.J., Faulkner, D., Bauman, S., Arens, E.A., Pih, D., & Mc Neel, P.J., « Indoor air flow and pollutant removal in a room with task ventilation ». In: Proceedings of the 11<sup>th</sup> AIVC Conference, Belgirate, Italy, 1990.

Gazette officielle du Québec, « Règlement sur la santé et la sécurité du travail », partie 2, S-2.1, r.19.01, Lois et règlements du Québec, éditeur officiel Québec, 4 Juillet 2001.

Goyer, Nicole. Lesage, Jacques & Vincent J.-Y., « Les Isocyanates dans les Ateliers de Peinture Automobile : Évaluation de l'exposition », Rapport de recherche de l'IRSST. Montréal, Québec, Septembre 1989.

Goyer, Nicole, « Critères de performance des cabines de peinture munies de ventilation verticale », Rapport de recherche de l'IRSST. Montréal, Québec, Mai 1993.

Hampl, V., « Evaluation of industrial local exhaust hood efficiency by a tracer gas technique », Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 45, 7, pp.485-490, 1984.

Hampl, V., Niemela, R., & Shulman, Bartley, « Use of tracer gas technique for industrial exhaust hood efficiency evaluation », Am. Ind. Hug. Assoc. J., 45, 5, pp.281-287, 1986.

Harrje, D.T., Gadsby, K., & Linteris, G. « Sampling for air exchange : rates in a variety of buildings », ASHRAE Transactions, 88(1), 1373-1384, 1982.

Institut National de Recherche et de Sécurité, Guide pratique de ventilation, Édition INRS éd 663, Décembre 1986.



Institut National de Recherche et de Sécurité, «Peinture des matériels de grandes dimensions», Guide pratique de ventilation, éd 713, 1988.

Institut de recherche en Santé et Sécurité du Travail du Québec, INFO-LABO, No. 90-01, Février 1990.

Kevin E. Ashley, « Analytical Instruments Performance Criteria: Selecting isocyanates sampling and analytical methods», Applied Occupational and Environmental Hygiene, Vol 17, Number 3, pp.157-162, March 2002.

Lefevre, A., Peltier, A., & Dessagne, J.M., « Galvanisation à chaud : Évaluation de dispositifs de captage sur des creusets de zinc fondu ». Cahiers de notes documentaires de l'INRS, n° 164, ND 2025, pp. 301-320, 1996.

Leleu, J.M., « Peintures a solvants : Composition et risques toxicologiques», Cahier de notes documentaires, INRS. N° 98, 1<sup>er</sup> Trimestre, 1980.

Lesage, Jaques., Perrault, Guy & Desjardins, France, « Caractérisation Physique et Chimique de l'exposition des Travailleurs aux Isocyanates». American Industrial hygiene Association Journal, Vol 53, pp.146-153, 1992.

Lesage, Jaque. Ostiguy, Claude, « Guide sécuritaire d'utilisation des isocyanates », Rapport de recherche, Montréal, IRSST, 2002.

Malo, J.L., L'Archeveque J., Cartier A., « Significant changes in nonspecific bronchial responsiveness after isolated immediate bronchospastic reactions caused by isocyanates but not after a late reaction caused by plicatic acid», J. Allergy Clin. Immunol., 83, 1989.

Mulhausen, John.R., Damiano, Joseph, « *A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures*», American Industrial Hygiene Association and the Exposure Assessment Strategies Committee, Second edition, 1998.

Muller, J., Aubertin, G., « Efficacité de captage et courants d'air perturbateurs», Cahier de notes documentaires de l'INRS, ND 1636-128-87, Paris, France, 1987.

National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH Manual of Analytical Methods, 142, 2<sup>e</sup> éd., 1977.

National Institute of occupational safety and health: Criteria for a Recommended Standard, Occupational Exposure to Diisocyanates, NIOSH 78-215 Rockville, 1978.

Niemela, R., «A tracer pulse method for the assessment of airflow patterns in a particleboard mill», Scandinavian journal of work Environment and Health, 12, pp.504-511, 1986.

Niemala, R., Saamanen, A., & Koskela, H., « A comparison between the step-up, step-down and pulse injection techniques for the measurements of the mean age of air». In: Proceedings the 10<sup>th</sup> AIVC Conference, Dipoli, Finland, 1989.

Niemelä, R., Saamanen, A., & Koskela, H., « Simulation of contaminant generation and dispersion by tracer gas release». In :Vincent, J.H.(ed), Ventilation 88, 55-61, Oxford, Pergamon Press, 1989.

Niemelä R., Lefèvre A., Muller, J.P., & Aubertin G., « Comparaison of three tracer gases for determining ventilation effectiveness and capture efficiency». Annals of Occupational Hygiene, 35, 4, pp.405-417, 1992.

Norme Française enregistrée, « Mesure de débit de gaz dans les conduites fermées : Méthodes par traceurs», éditée par Association française de normalisation afnor, NF X10-141, Paris, Novembre 1982.

Patterson R, Hargreave F.E., Grammer LC, Harris KE and Dolovich J., « Toluene diisocyanate respiratory reactions», Int. Archs. Allergy Appl. Immun. 84:93-100, 1987.

Penman, J.M., & Rashid, A.M., « Experimental determination of air-flow in a naturally ventilated room using metabolic carbon dioxide», Building and Environment, 17, pp. 253-256, 1982.

Persily, A.K., & Linteris, G.T., « A comparison of measured and predicted infiltration rates», ASHRAE Transactions, 89 (2B), pp.183-200, 1983.

Podolak, A., Cassidy, Exposito., & Kippenberger, G.J., « *Sampling and Calibration for Atmospheric Measurements*», ASTM AST 957, pp. 203-212, 1987.

Regnier, R., Braconnier, R. & Aubertin, G., « Study of capture devices integrated into portable machine-tools». In :goodfellow, H.D (ed) Ventilation 85,579-591. Amstrerdam : Elsevier Science Publishers, 1986.

Regnier, R., Dessagne. J.M., & Bonthoux, F., « Cuves de traitement de surface- Performance de captage de fentes d'aspiration ». Cahiers de notes documentaires de l'INRS, n° 165, ND 2030, pp. 425-441, 1996.

Riffat, S.B., Eid, M. & Littler, J., « Developments in a multi-tracer gas system and measurements using portable SF<sub>6</sub> equipment». In: Proceedings of the 8<sup>th</sup> AIVC Conference, Uberlingen, Germany, 1987.

Riffat, S.B., & Holmes, M., « Measurement of airflow in HVAC systems using tracer-gas techniques» In: Proceedings of the 11<sup>th</sup> AIVC Conference, Belgirate, Italy, 1990.

Sandberg, M., « Draft proposal of a method for determination of room-average age (room-average air diffusion efficiency) of ventilation air », Gavle, National Swedish Institute for Building Research, 1983.

Sandberg, M., « Local mean age of air », Gavle, National Swedish Institute for Building Research, 1986.

Streicher, Robert., Reh, Christopher., Key-Schwartz, Rosa., Schlecht, Paul., Cassinelli, Mary Ellen & O'Connor Paula., « Selecting Isocyanate Sampling and Analytical Methods», Applied Occupational and Environmental hygiene, Vol 17, N. 3, pp.157-162, Mars 2002.

Sutcliffe, H. & Waters, J.R., « Errors in the measurement of local and room mean age using tracer gas methods». In: Proceedings of the 11<sup>th</sup> AIVC Conference, Belgirate, Italy, 1990.

UQAM, Site Internet. (page consultée le 28 Janvier 2002).URL:<http://www.tc.gc.ca/canutech/fr/articles/documents/isocy.htm>.

Vavasseur, C., Muller, J.P., Aubertin, G. & Lefevre, A., « Application parameters in nuclear power plants and various industrial sectors».In : Goodfellow, H.D.(ed). Ventilation 85,785,796, Amsterdam, Elsevier Science Publishers, 1986.

Vincent, Jean-Yves, « Exposition des travailleurs aux isocyanates dans les ateliers de carrosserie », Programme Provincial sur les isocyanates, Québec, Automne 2000.

Yu-Mei Tan & Michael R, Flynn, « Methods for Estimating the Transfer Efficiency of a Compressed Air Spray Gun », Applied Occupational and Environmental Hygiene, Volume 17 (1), pp.39-46, 2002.

## ANNEXE A

### Calcul simplifié de la composante aléatoire de l'incertitude sur $C_3$ (95 %)

L'incertitude sur l'efficacité minimale  $\eta_C$  (95 %) est fonction de nombreux paramètres, notamment de la composante aléatoire de l'incertitude sur  $C_3$  (95 %).

Cette composante aléatoire, qui dépend du nombre de points indépendants réalisés lors de la mesure de  $C_3$ , peut être estimée en supposant une fois encore que les concentrations  $C_3$  suivent une loi normale.

La fractile issu de la population ( $C_3$ , S) est asymptotiquement normal à :

$$C_3 - t \sigma, [2 \Pi q (1 - q)] * \sigma / e^{-t * t / 2} * (n)^{1/2}$$

Où :

$q$  : est le fractile considéré ;

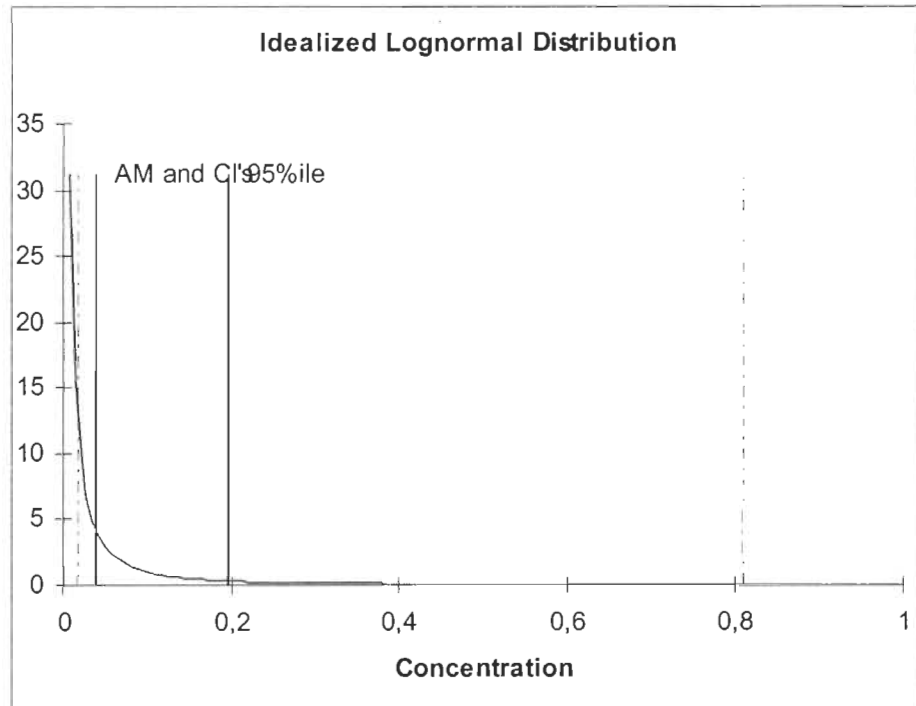
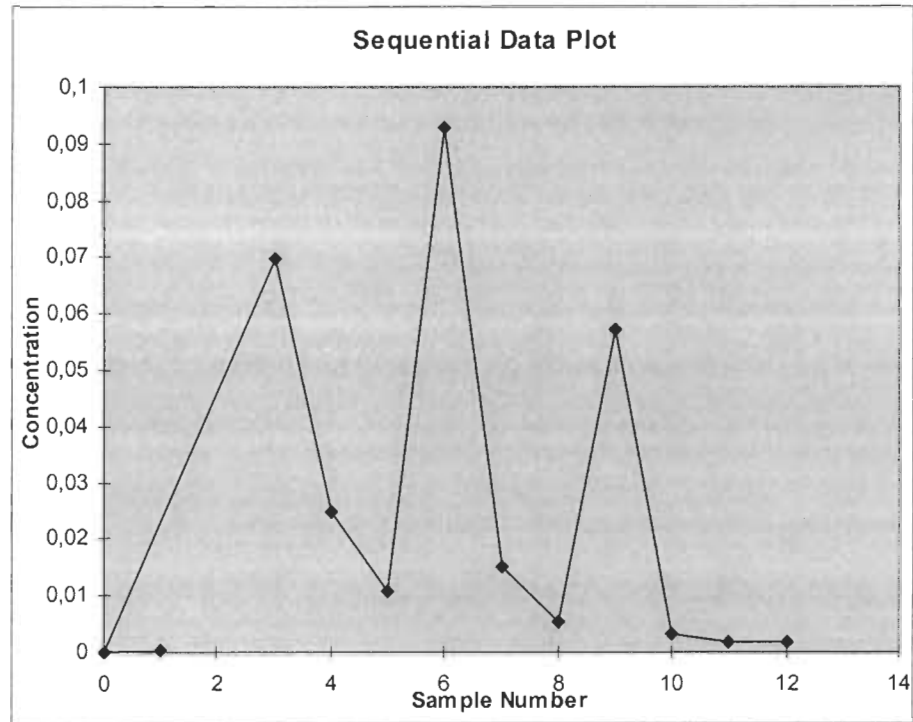
$t$  : est la valeur issues d'une table de loi normale réduite telle que la probabilité

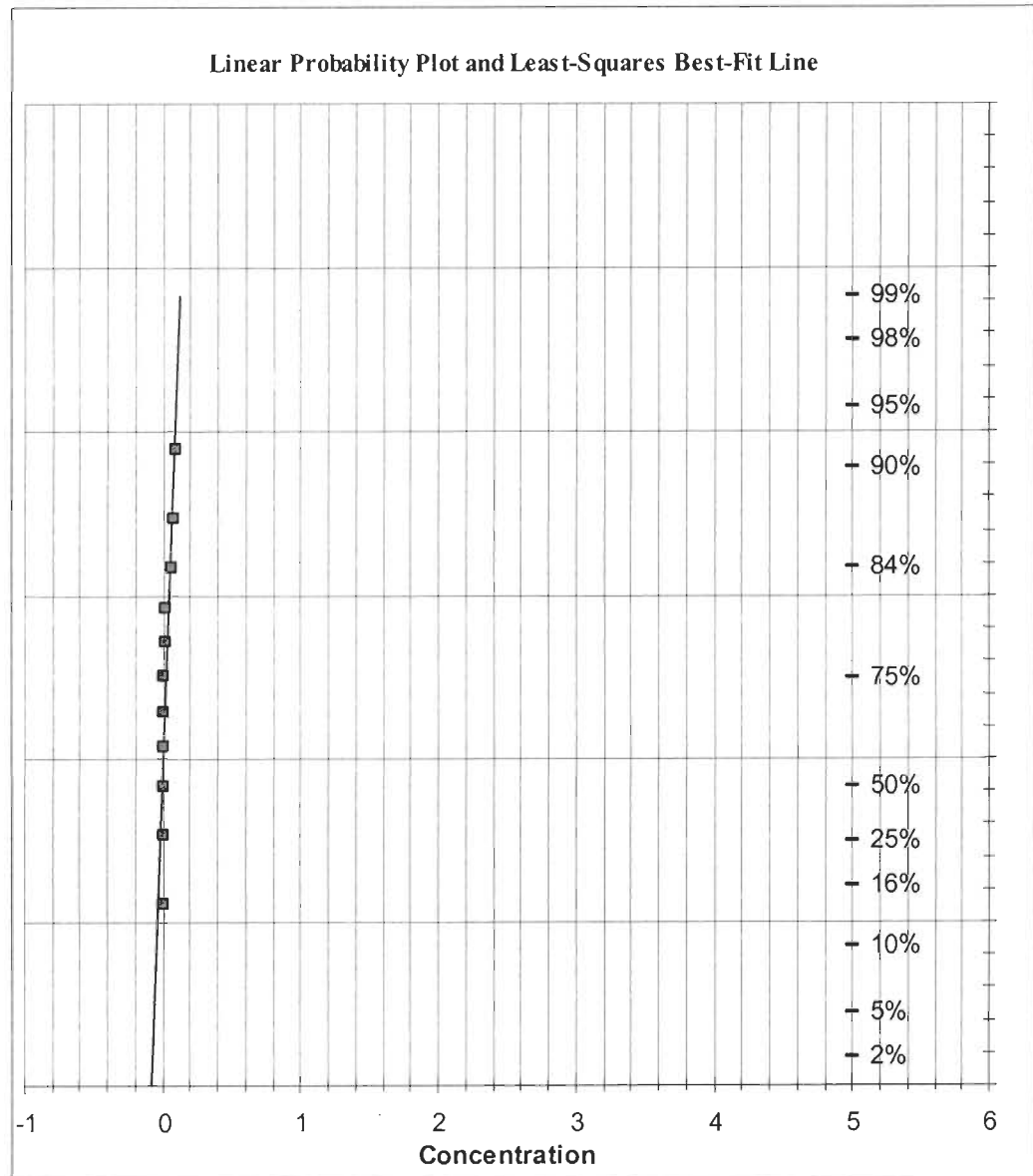
$\{X < t\}$  soit égale à  $q$ .

## ANNEXE B

**Cabine (A) : Statistiques des données d'échantillonnage de SF<sub>6</sub> au  
poste 1 lors de l'application de la peinture**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
150	Number of samples (n)	11
Sample Data (max n = 50) No less-than (<) or greater-than (>)	Maximum (max)	0,09273
	Minimum (min)	0,000383
	Range	0,092347
	Percent above OEL (%>OEL)	#REF!
	Mean	0,026
0,000383	Median	0,011
0,06993	Mean of logtransformed data (LN)	-4,650
0,024733	Std. deviation of logtransformed data (LN)	1,835
0,01096	Geometric mean (GM)	0,010
0,09273	Geometric standard deviation (GSD)	6,265
0,01493	TEST FOR DISTRIBUTION FIT	
0,0054	W-test of logtransformed data (LN)	0,869
0,0573	Lognormal (a = 0.05)?	Yes
0,00307	W-test of data	#REF!
0,001936	Normal (a = 0.05)?	#REF!
0,00187	LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS	
	Estimated Arithmetic Mean - MVUE	0,038
	LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	0,016
	UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	0,809
	95th Percentile	0,196
	UTL <sub>95%,95%</sub>	1,675
	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0.1
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0.1



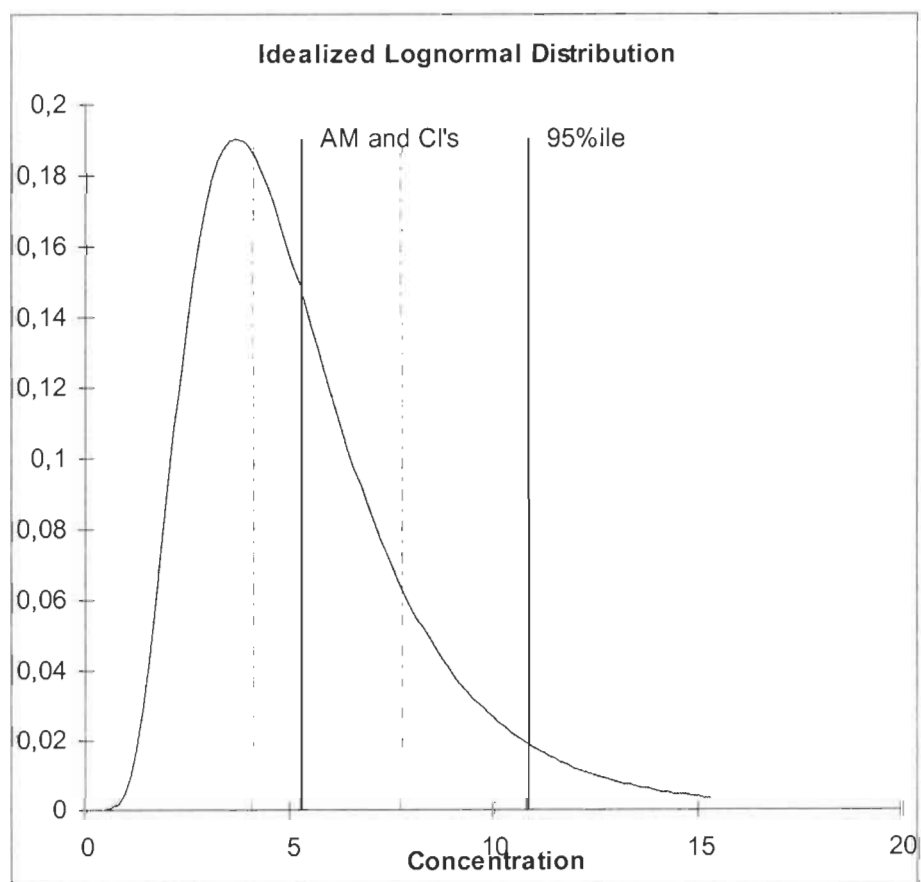
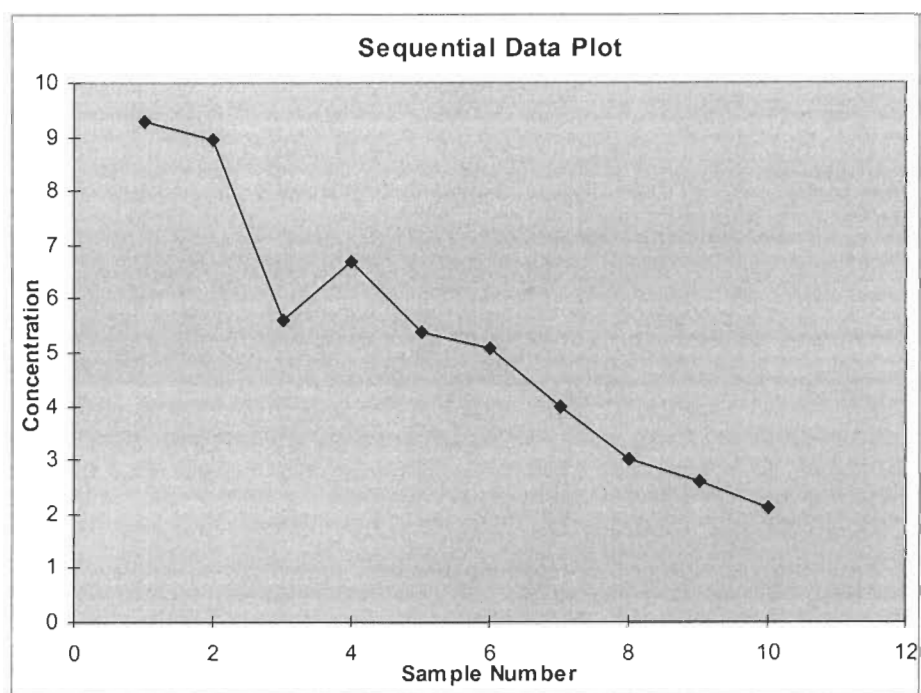


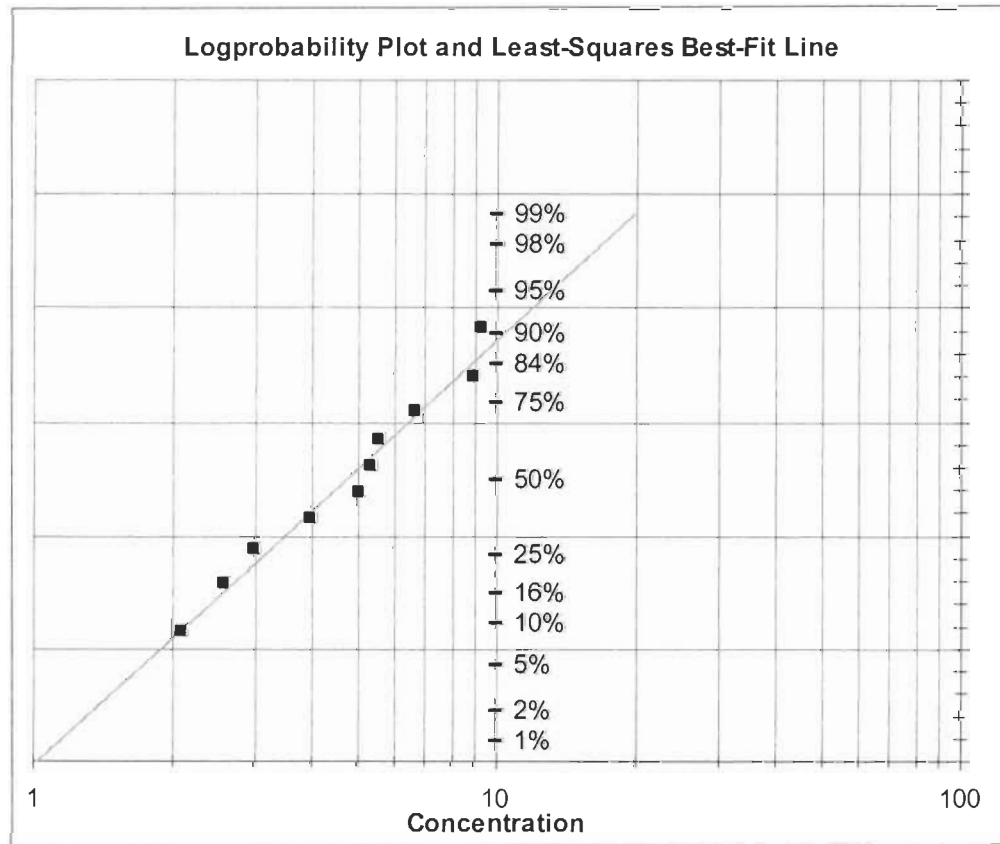
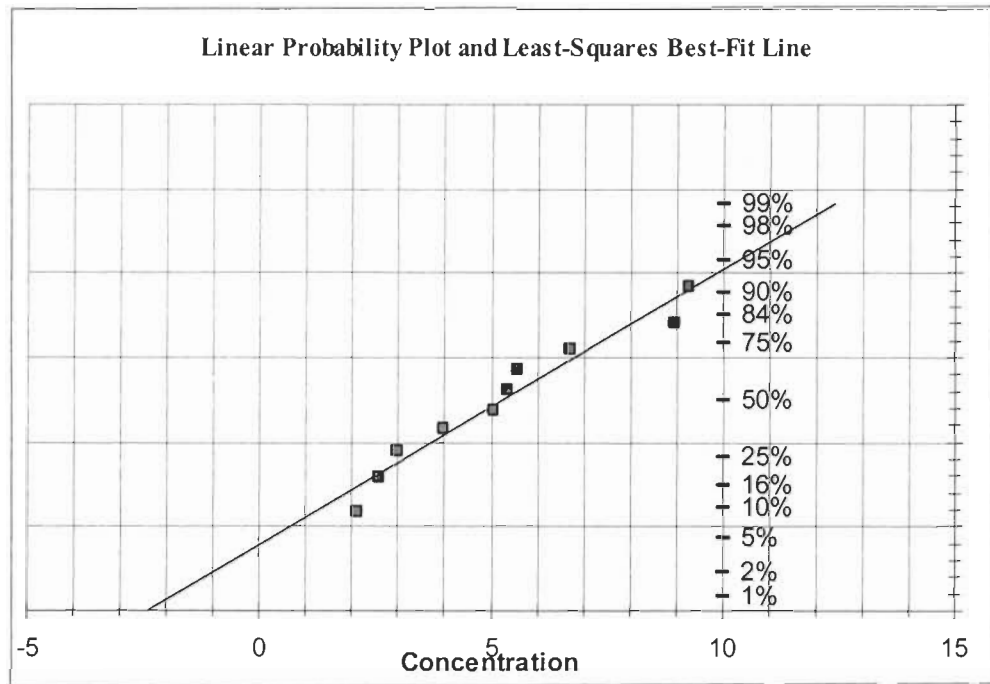
## ANNEXE C

**Cabine (A) : Statistiques des données d'échantillonnage de SF<sub>6</sub> au  
poste 2 lors de l'application de la peinture**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
150	Number of samples (n)	10
Sample Data (max n = 50)	Maximum (max)	9,28
	Minimum (min)	2,1
No less-than (<) or greater-than (>)	Range	7,18
9,28	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
8,95	Mean	5,266
5,6	Median	5,222
6,696	Standard deviation (s)	2,490
5,373	Mean of logtransformed data (LN)	1,553
5,07	Std. deviation of logtransformed data (LN)	0,504
3,99	Geometric mean (GM)	4,724
2,996	Geometric standard deviation (GSD)	1,655
2,6	TEST FOR DISTRIBUTION FIT	
2,1	W-test of logtransformed data (LN)	0,952
	Lognormal (a = 0.05)?	Yes
	W-test of data	0,932
	Normal (a = 0.05)?	Yes
	LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS	
	Estimated Arithmetic Mean - MVUE	5,290
	LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	4,091
	UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	7,752
	95th Percentile	10,824
	UTL <sub>95%,95%</sub>	20,488
	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0.1
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0,000
	NORMAL PARAMETRIC STATISTICS	
	Mean	5,266
	95th Percentile - Z	9,362
	UTL <sub>95%,95%</sub>	12,51
	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
	95th Percentile - Z	9,362



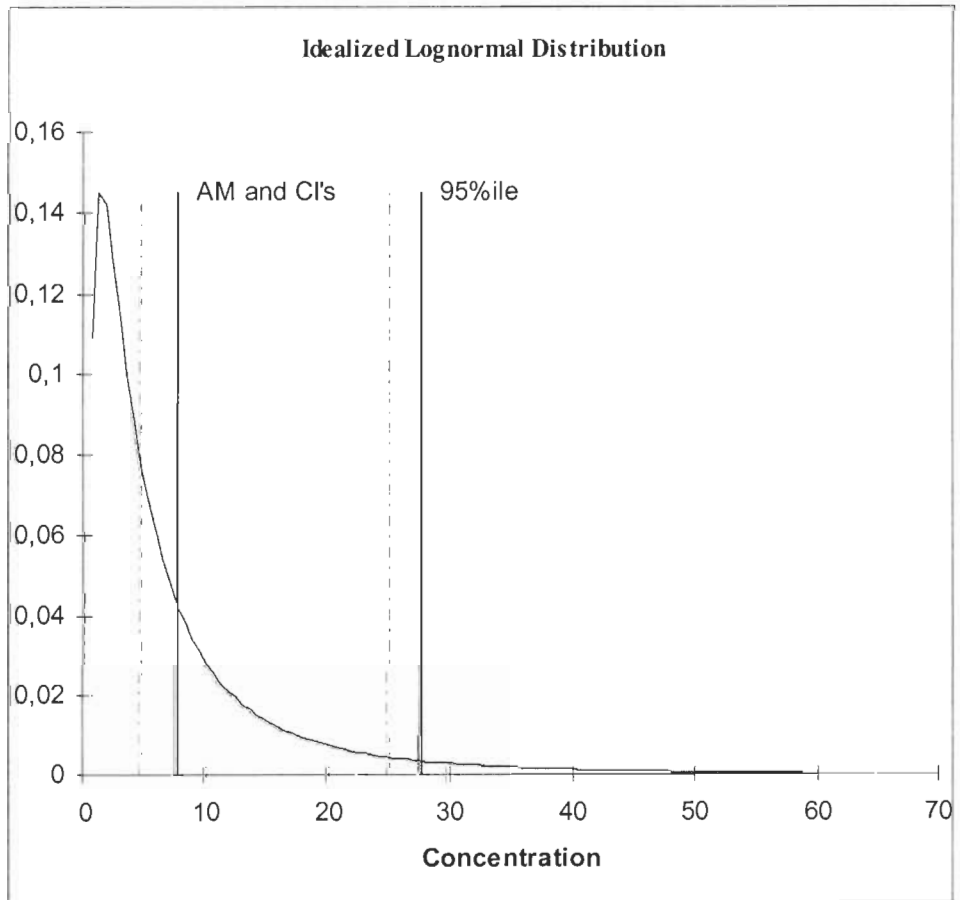
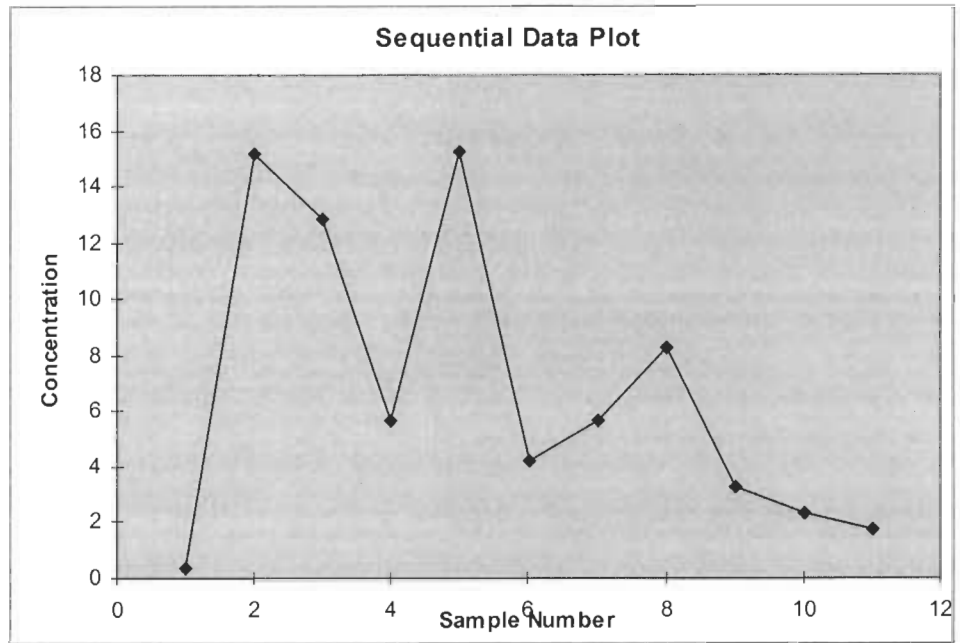


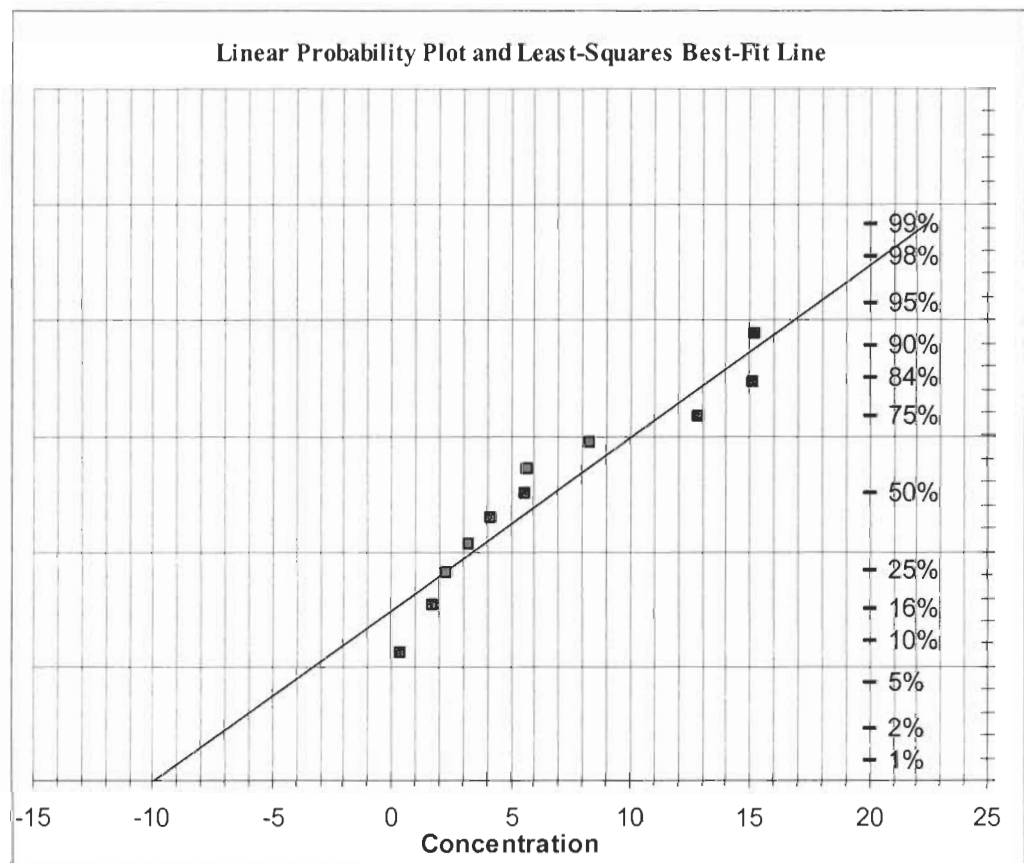
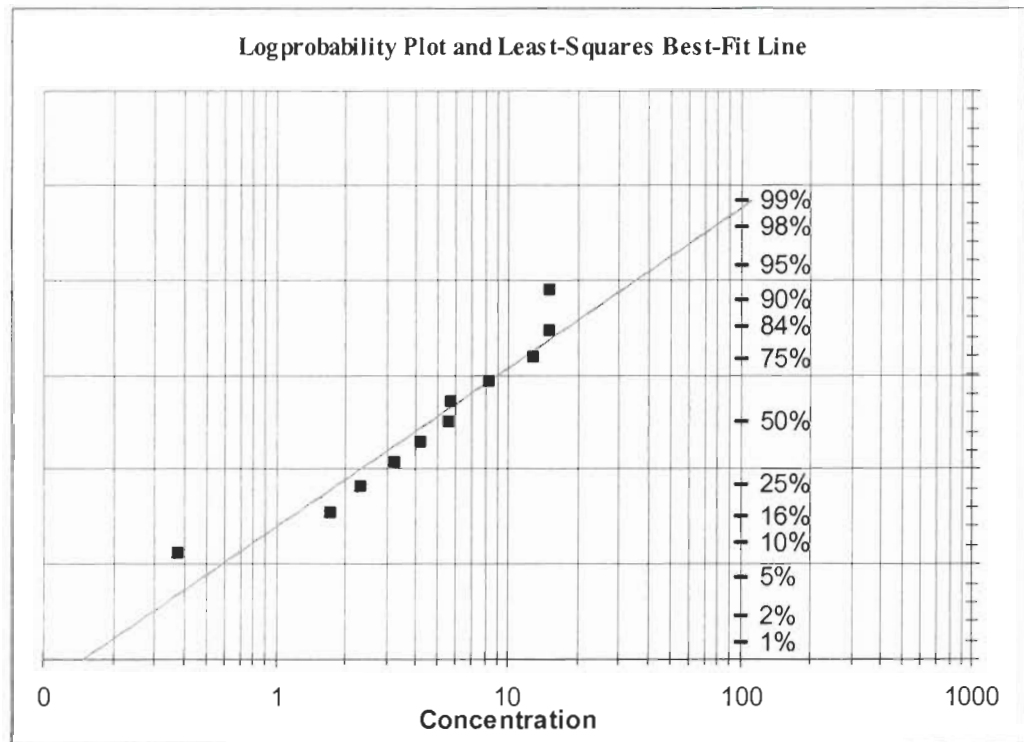


## ANNEXE D

**Cabine (A) : Statistiques des données d'échantillonnage de SF<sub>6</sub> au  
poste 3 lors de l'application de la peinture**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
150	Number of samples (n)	11
OEL	Maximum (max)	15,266
150	Minimum (min)	0,383
	Range	14,883
Sample Data	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
(max n = 50)	Mean	6,808
No less-than (≤)	Median	5,650
or greater-than (≥)	Standard deviation (s)	5,377
0,383	Mean of logtransformed data (LN)	1,514
15,166	Std. deviation of logtransformed data (LN)	1,099
12,86	Geometric mean (GM)	4,543
5,65	Geometric standard deviation (GSD)	3,001
15,266	TEST FOR DISTRIBUTION FIT	
4,22	W-test of logtransformed data (LN)	0,915
5,683	Lognormal (a = 0.05)?	Yes
8,31	W-test of data	0,884
3,296	Normal (a = 0.05)?	Yes
2,326	LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS	
1,73	95th Percentile	27,693
	UTL <sub>95%,95%</sub>	100,158
	Percent above OEL (%>OEL)	0,073
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0.1
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	2,946
	NORMAL PARAMETRIC STATISTICS	
	Mean	6,808
	LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	3,870
	UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	9,746
	95th Percentile - Z	15,653
	UTL <sub>95%,95%</sub>	21,94

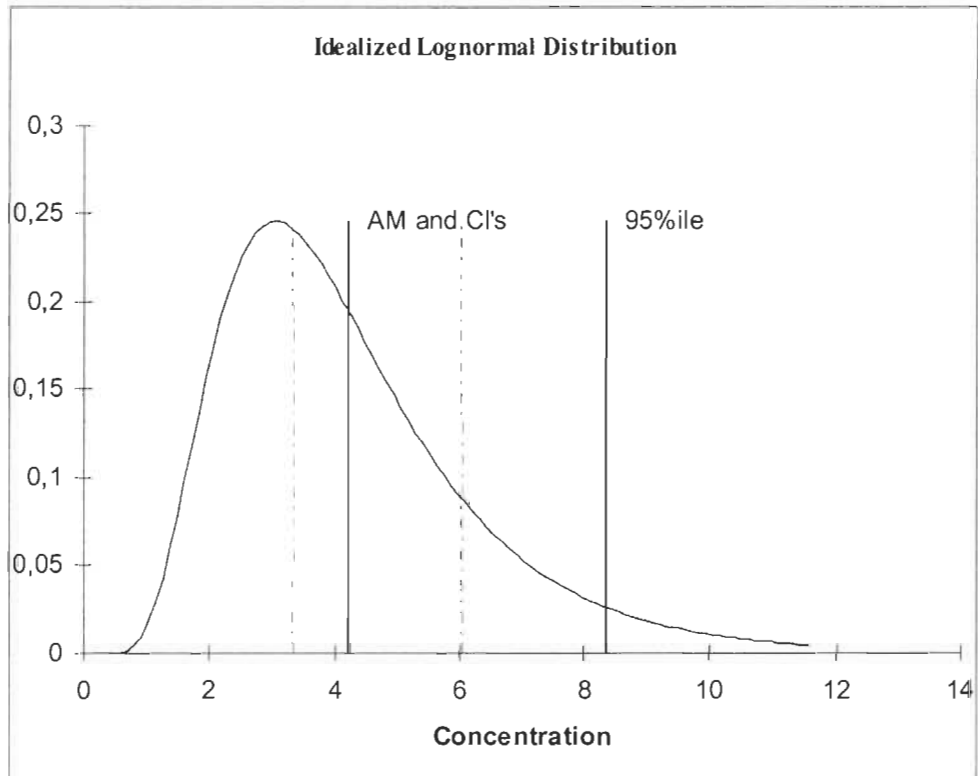
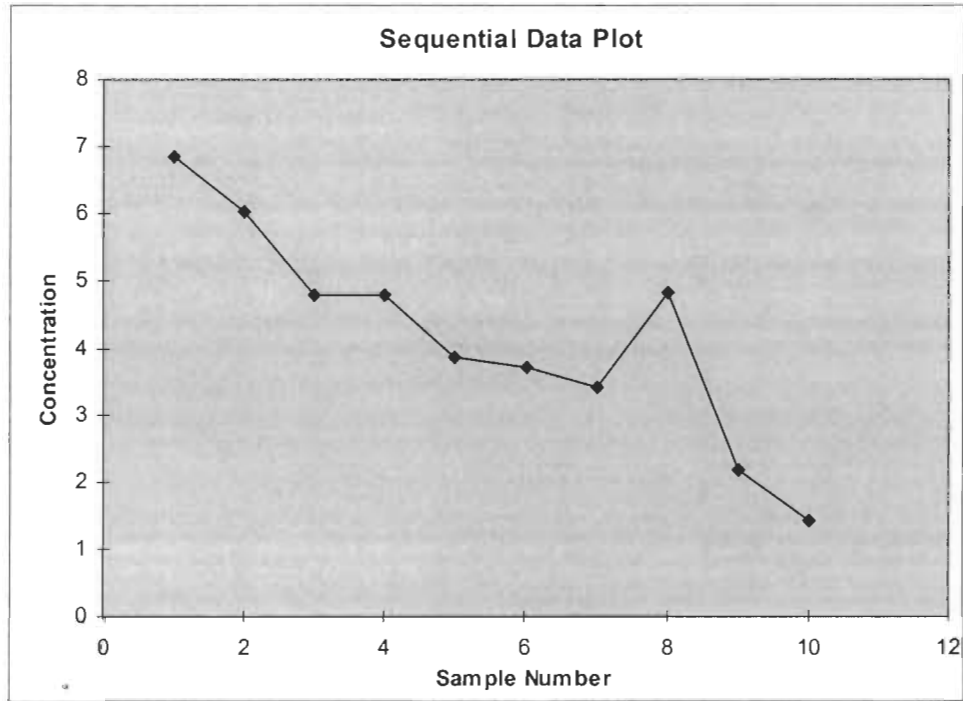




## ANNEXE E

**Cabine (A) : Statistiques des données d'échantillonnage de SF<sub>6</sub> au  
poste 4 lors de l'application de la peinture**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
150	Number of samples (n)	10
<b>Sample Data</b>	Maximum (max)	6,85
(max n = 50)	Minimum (min)	1,43
No less-than (<)	Range	5,42
or greater-than (>)	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
6,85	Mean	4,191
6,023	Median	4,333
4,81	Standard deviation (s)	1,642
4,81	Mean of logtransformed data (LN)	1,346
3,856	Std. deviation of logtransformed data (LN)	0,472
3,71	Geometric mean (GM)	3,841
3,41	Geometric standard deviation (GSD)	1,604
4,836		
2,17	<b>TEST FOR DISTRIBUTION FIT</b>	
1,43	W-test of logtransformed data (LN)	0,908
	Lognormal (a = 0.05)?	Yes
	W-test of data	0,972
	Normal (a = 0.05)?	Yes
	<b>LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	95th Percentile	8,355
	UTL <sub>95%,95%</sub>	15,196
	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0.1
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0,000
	<b>NORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	Mean	4,191
	LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	3,239
	UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	5,142
	95th Percentile - Z	6,892
	UTL <sub>95%,95%</sub>	8,97
	Percent above OEL (%>OEL)	0,000

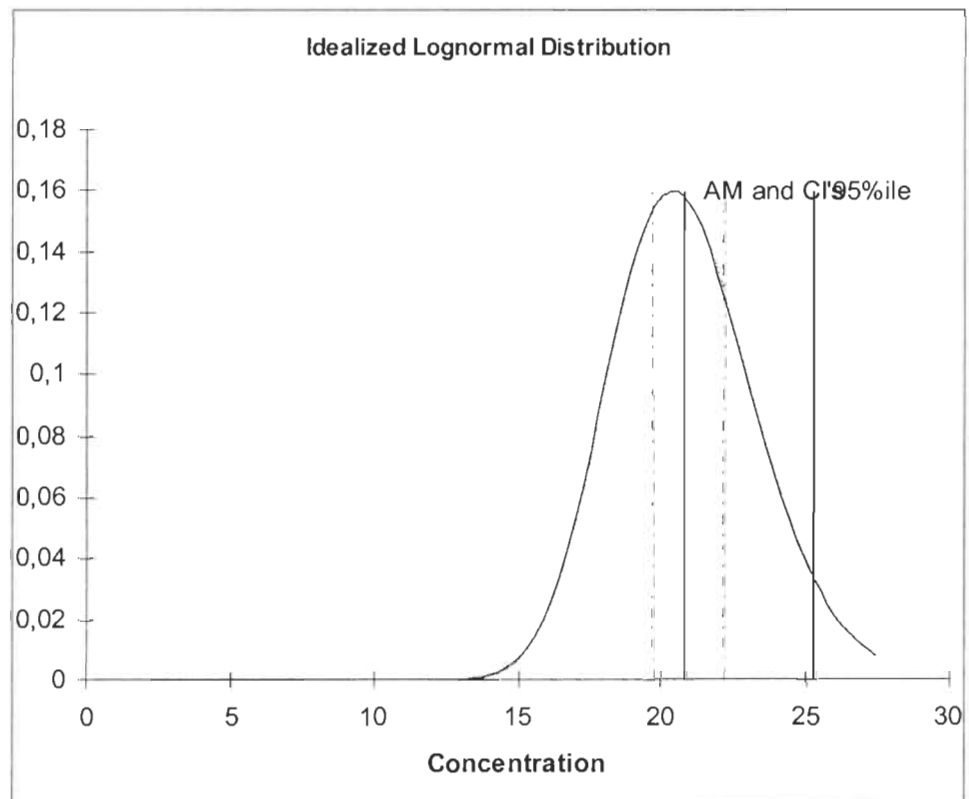
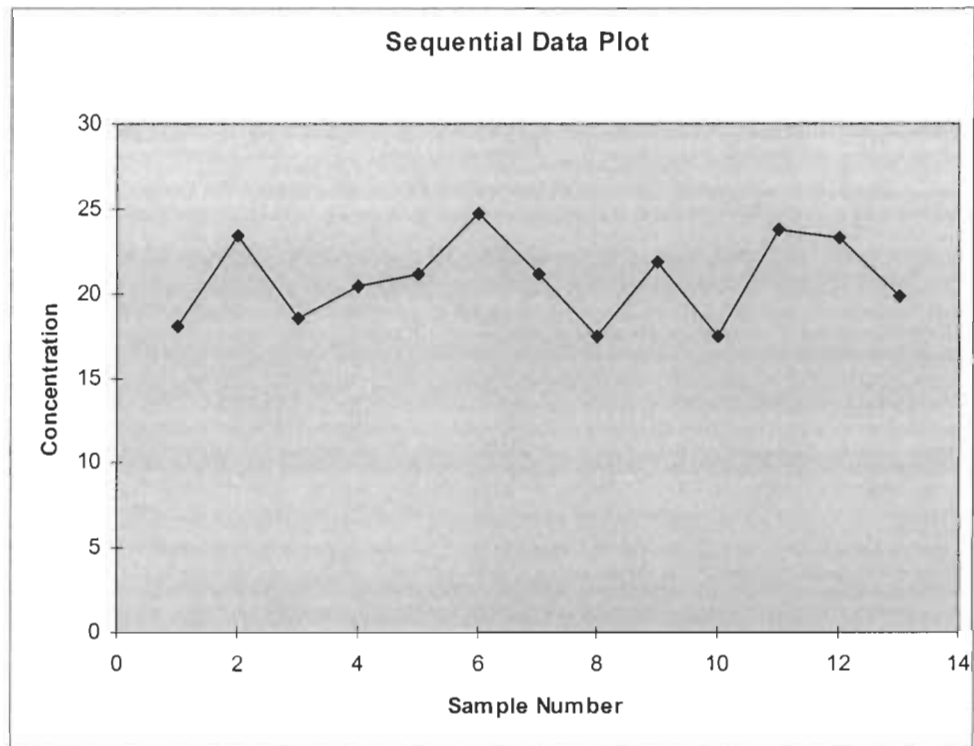


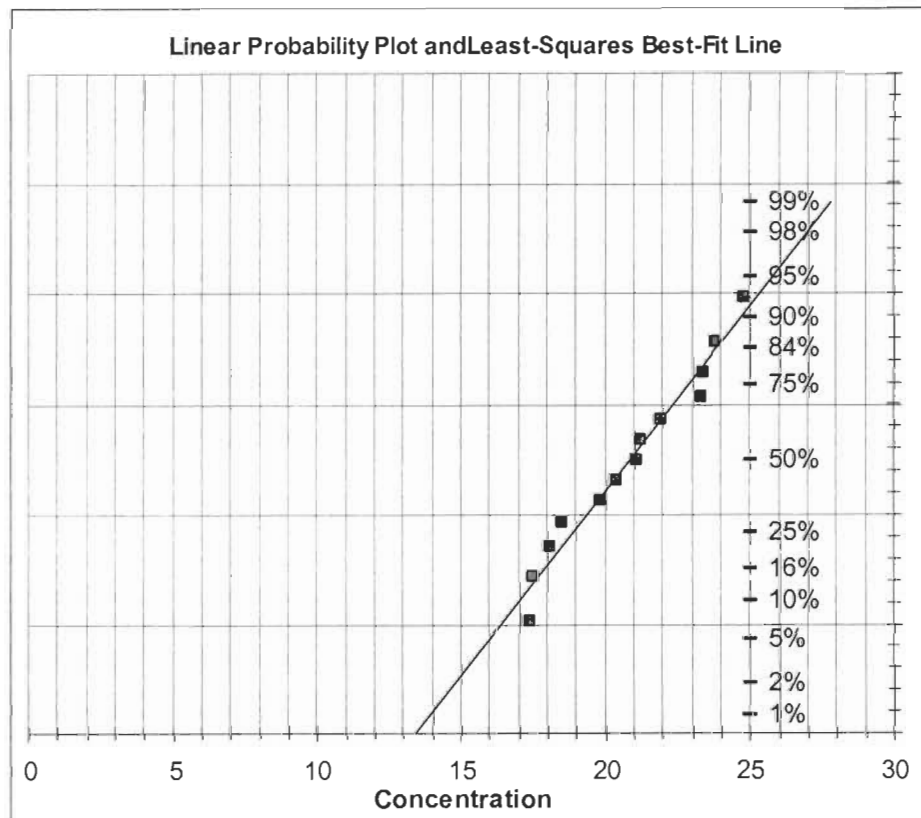
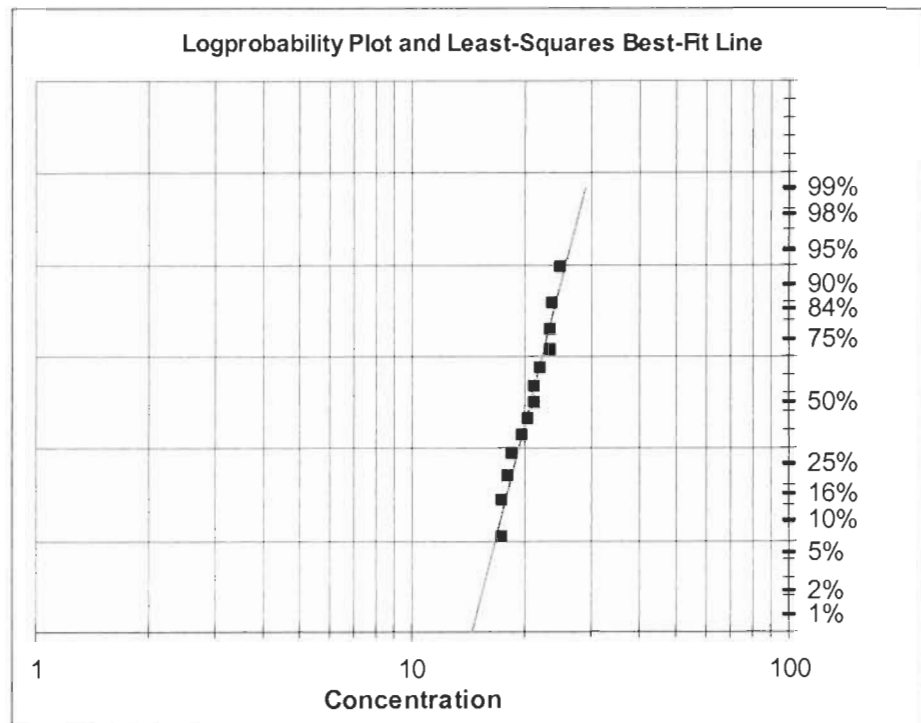
## ANNEXE F

**Cabine (A) : Statistiques des concentrations de SF<sub>6</sub> dans la cheminée  
lors d'application de la peinture**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
150	Number of samples (n)	13
	Maximum (max)	24,8
<b>Sample Data</b>	Minimum (min)	17,4
(max n = 50)	Range	7,4
No less-than (<)	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
or greater-than (>)	Mean	20,862
18,1	Median	21,100
23,4	Standard deviation (s)	2,510
18,5	Mean of logtransformed data (LN)	3,031
20,4	Std. deviation of logtransformed data (LN)	0,121
21,2	Geometric mean (GM)	20,721
24,8	Geometric standard deviation (GSD)	1,129
17,5	<b>TEST FOR DISTRIBUTION FIT</b>	
21,9	W-test of logtransformed data (LN)	0,937
17,4	Lognormal (a = 0.05)?	Yes
23,8		
23,3	W-test of data	0,940
19,8	Normal (a = 0.05)?	Yes
	<b>LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	<b>Estimated Arithmetic Mean - MVUE</b>	20,862
	LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	19,691
	UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	22,196
	<b>95th Percentile</b>	25,296
	UTL <sub>95%,95%</sub>	28,643
	<b>Percent above OEL (%&gt;OEL)</b>	0,000
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0.1
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0,000
	<b>NORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	<b>Mean</b>	20,862
	LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	19,621
	UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	22,102
	<b>95th Percentile - Z</b>	24,991
	UTL <sub>95%,95%</sub>	27,56
	<b>Percent above OEL (%&gt;OEL)</b>	0,011



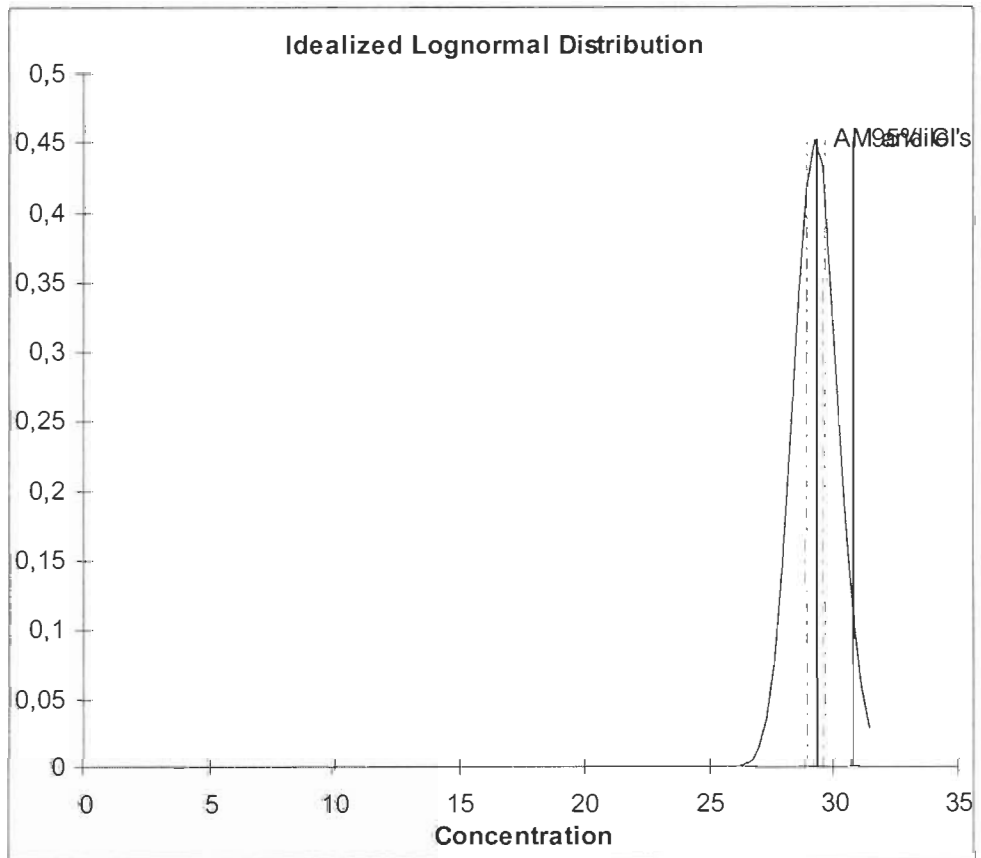
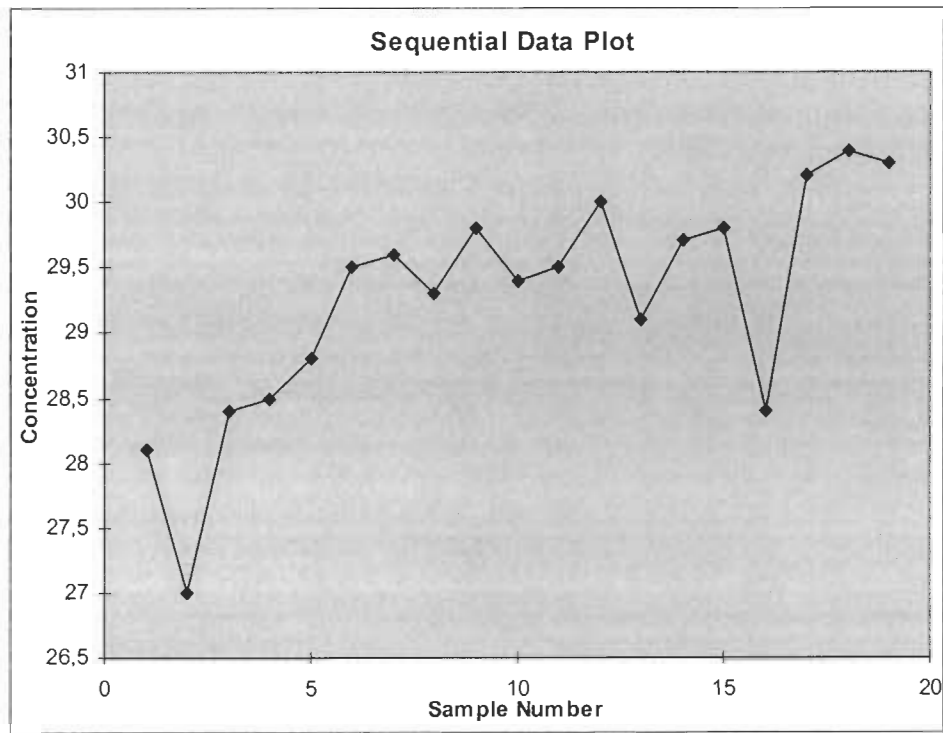


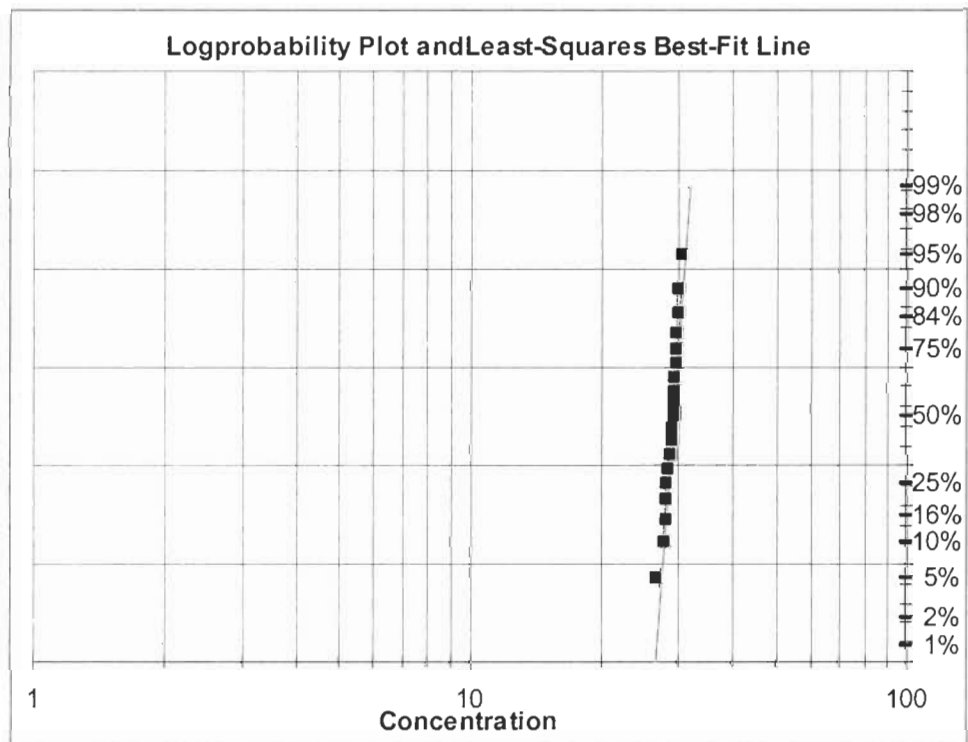
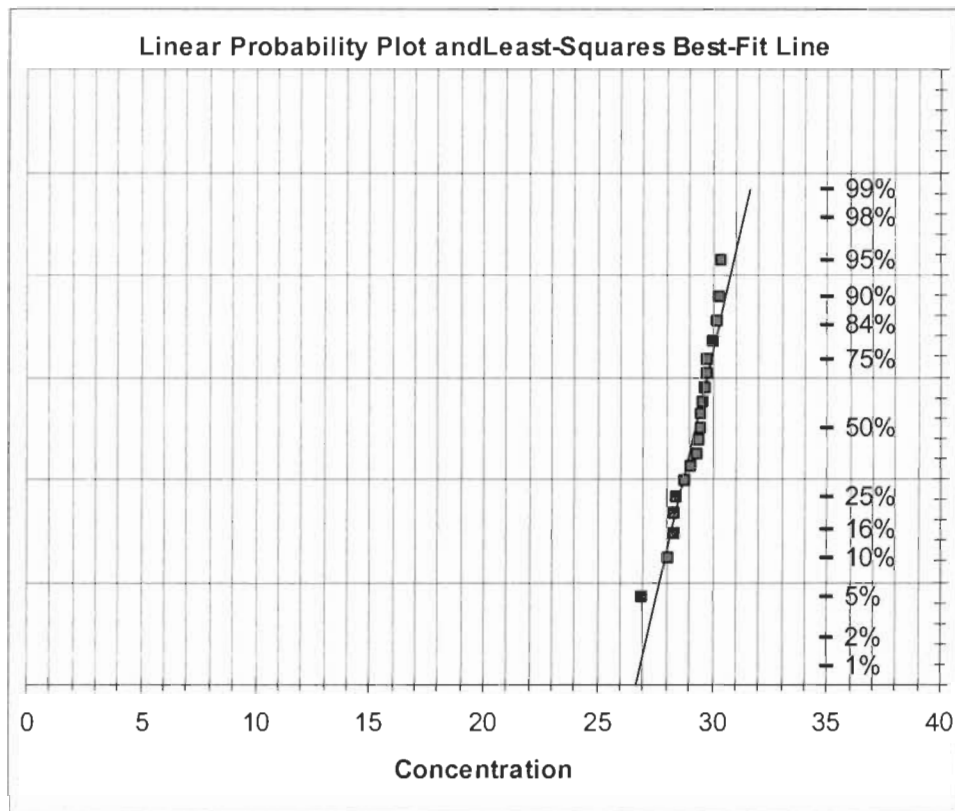


## ANNEXE G

**Cabine (A) : Statistiques des concentrations de SF<sub>6</sub> dans la cheminée  
lors d'une injection directe dans le conduit d'évacuation**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
150	Number of samples (n)	19
<b>Sample Data</b>	Maximum (max)	30,4
(max n = 50)	Minimum (min)	27
No less-than (<=)	Range	3,4
or greater-than (>=)	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
28,1	Mean	29,253
27	Median	29,500
28,4	Standard deviation (s)	0,869
28,5	Mean of logtransformed data (LN)	3,376
28,8	Std. deviation of logtransformed data (LN)	0,030
29,5	Geometric mean (GM)	29,240
29,6	Geometric standard deviation (GSD)	1,031
29,3	<b>TEST FOR DISTRIBUTION FIT</b>	
29,8	W-test of logtransformed data (LN)	0,922
29,4	Lognormal (a = 0.05)?	Yes
29,5	W-test of data	0,930
30	Normal (a = 0.05)?	Yes
29,1	<b>LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
29,7		
29,8	Estimated Arithmetic Mean - MVUE	29,253
28,4	LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	28,907
30,2	UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	29,608
30,4	95th Percentile	30,725
30,3	UTL <sub>95%,95%</sub>	31,454
	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0.1
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0,000
	<b>DESCRIPTIVE STATISTICS</b>	
	<b>NORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	Mean	29,253
	LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	28,907
	UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	29,598
	95th Percentile - Z	30,682
	UTL <sub>95%,95%</sub>	31,36
	Percent above OEL (%>OEL)	0,000

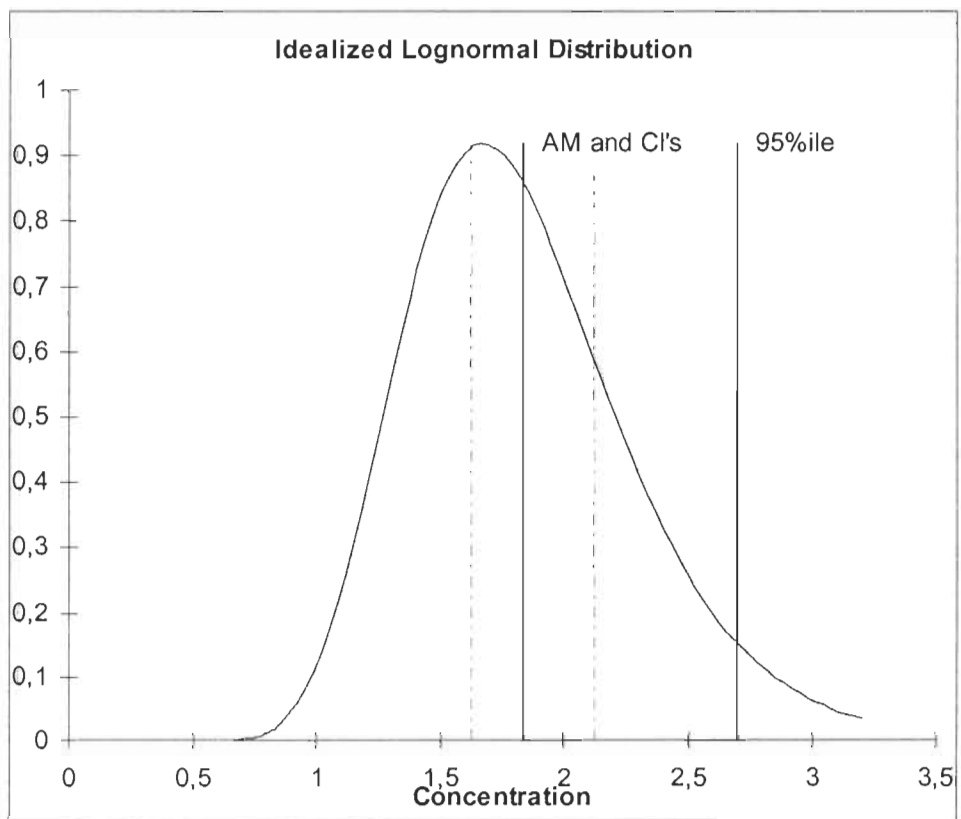
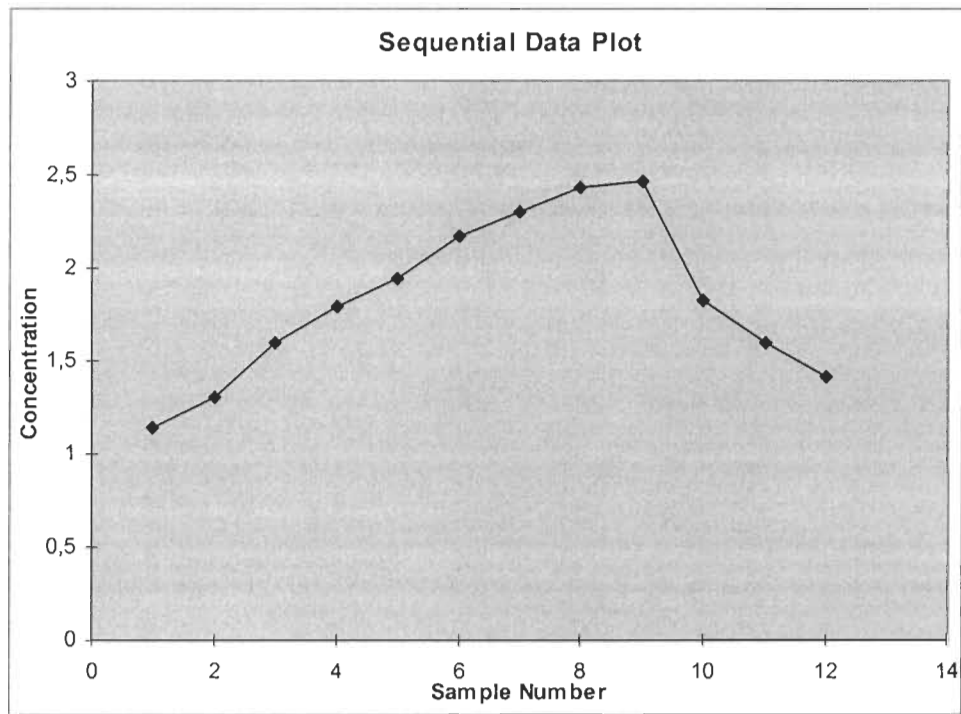


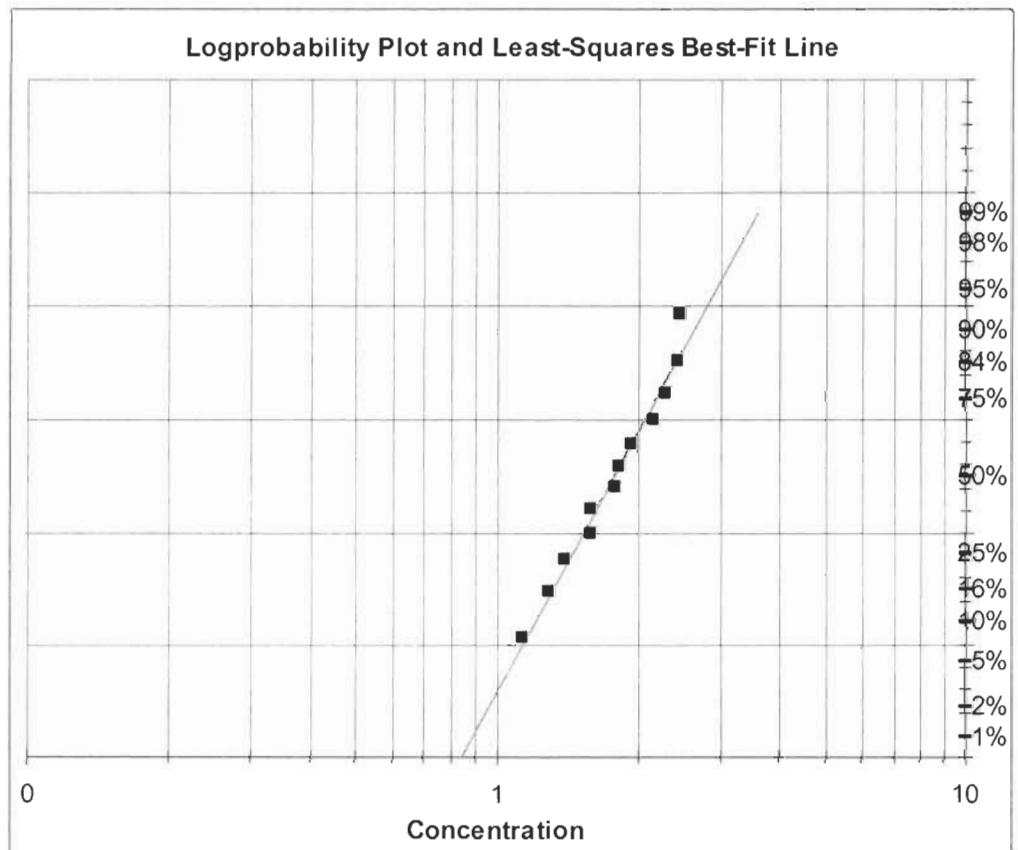
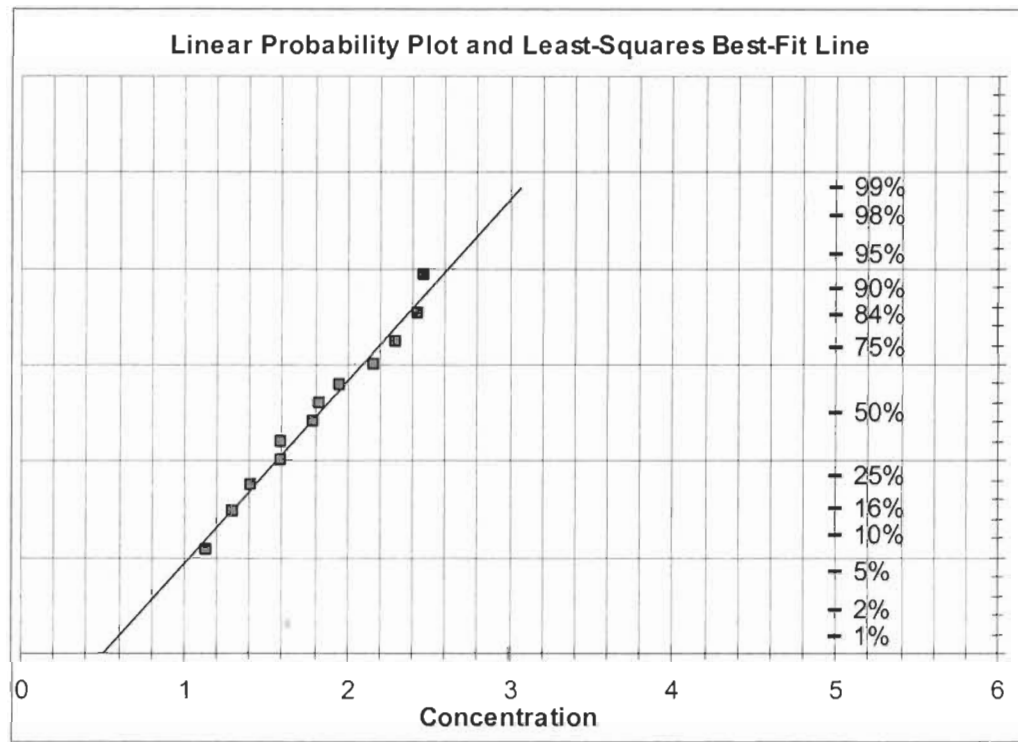


## ANNEXE H

**Cabine (B) : Statistiques des concentrations de SF<sub>6</sub> au poste 1 lors  
de l'application de la peinture**

DESCRIPTIVE STATISTICS		OEL
Number of samples (n)	12	5
Maximum (max)	2,47	<b>Sample Data</b>
Minimum (min)	1,14	(max n = 50)
Range	1,33	No less-than (<)
Percent above OEL (%>OEL)	0,000	or greater-than (>)
Mean	1,833	1,14
Median	1,810	1,3
Standard deviation (s)	0,444	1,6
Mean of logtransformed data (LN)	0,578	1,79
Std. deviation of logtransformed data (LN)	0,251	1,95
Geometric mean (GM)	1,782	2,17
Geometric standard deviation (GSD)	1,286	2,3
<b>TEST FOR DISTRIBUTION FIT</b>		2,44
W-test of logtransformed data (LN)	0,955	2,47
Lognormal (a = 0.05)?	Yes	1,83
W-test of data	0,954	1,6
Normal (a = 0.05)?	Yes	1,41
<b>LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>		
Estimated Arithmetic Mean - MVUE	1,835	
LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	1,625	
UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	2,116	
<b>95th Percentile</b>	2,695	
UTL <sub>95%,95%</sub>	3,546	
Percent above OEL (%>OEL)	0,002	
<b>NORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>		
Mean	1,833	
LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	1,603	
UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	2,064	
<b>95th Percentile - Z</b>	2,565	
UTL <sub>95%,95%</sub>	3,05	
Percent above OEL (%>OEL)	0,000	



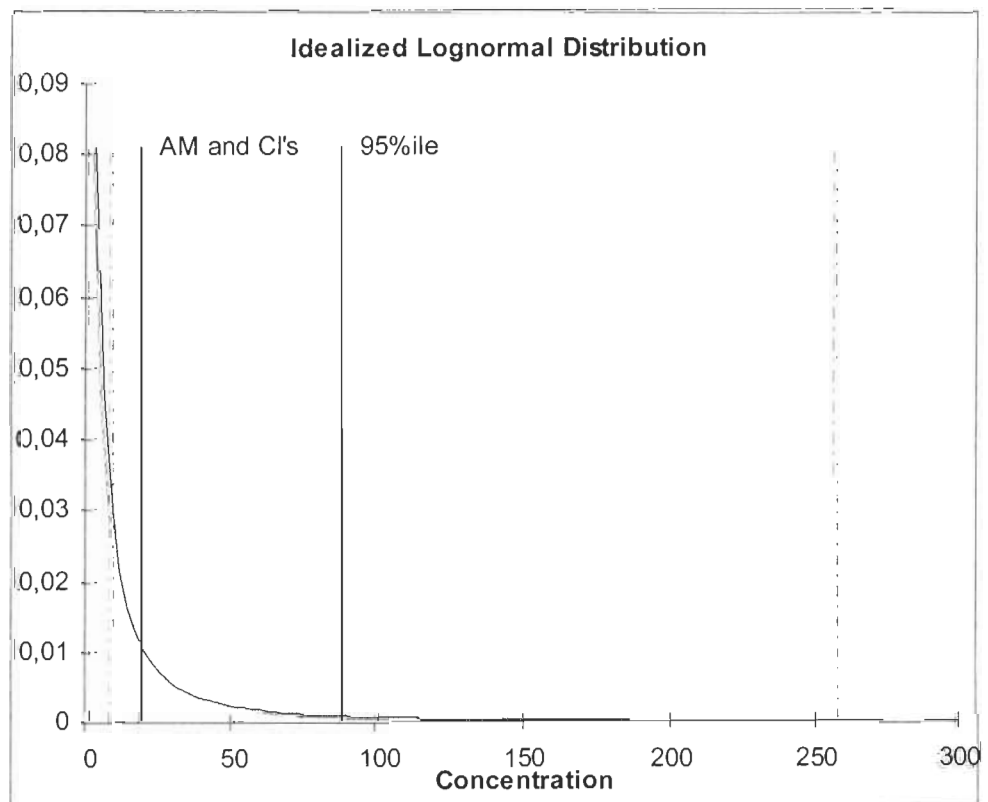
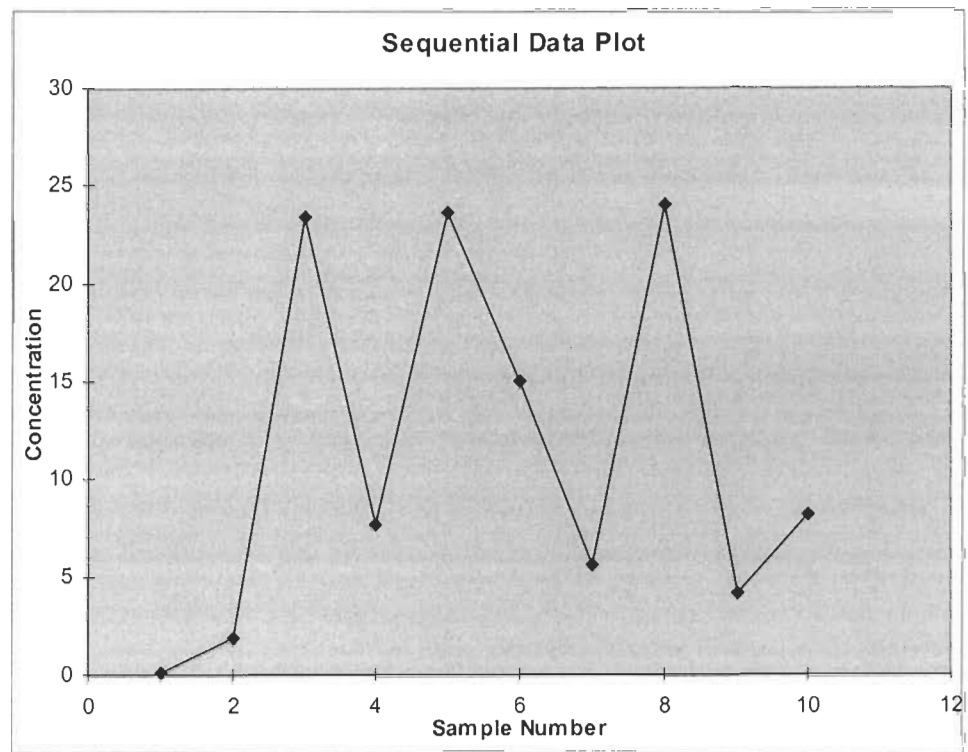


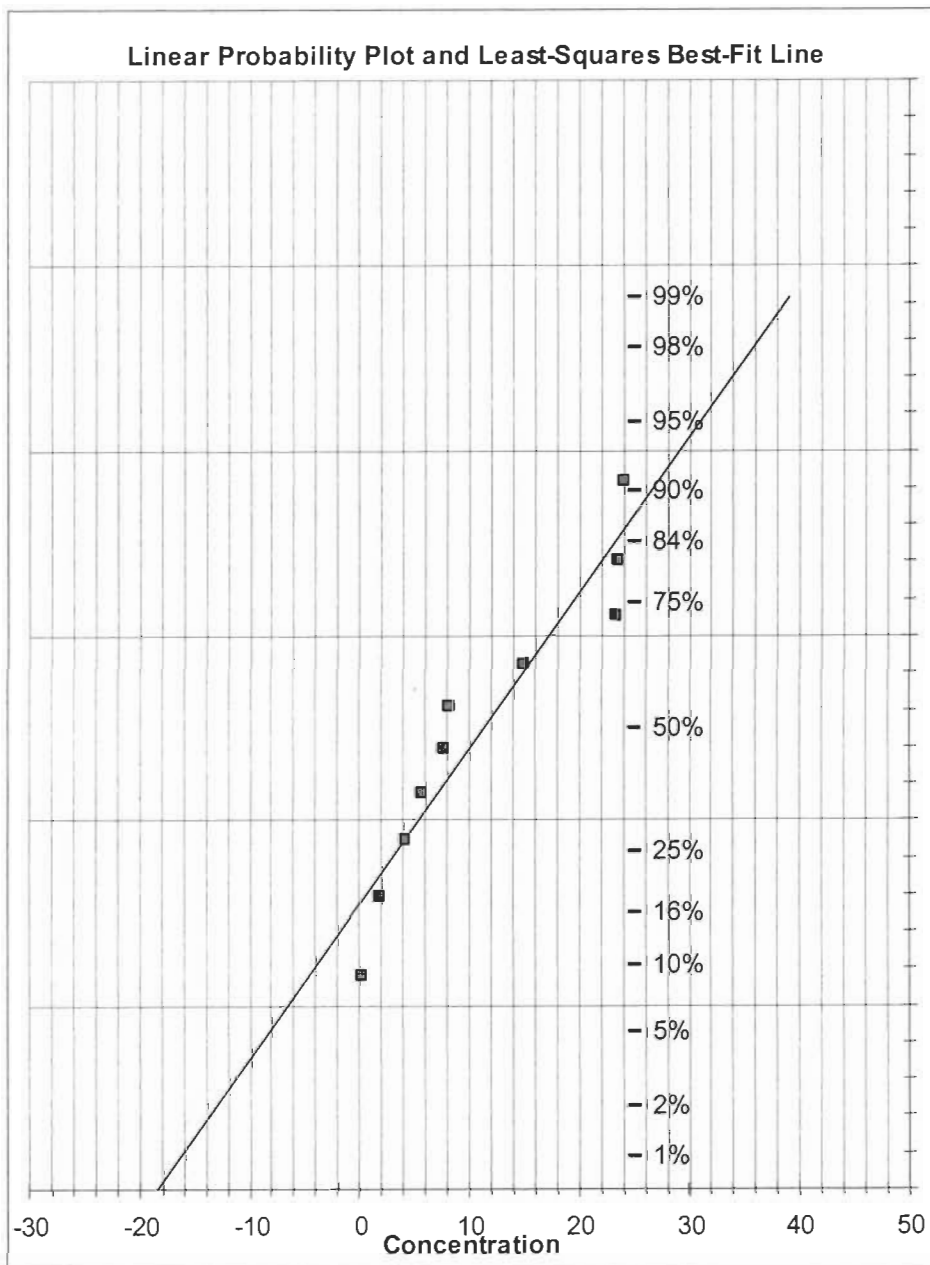


## ANNEXE I

**Cabine (B) : Statistiques des concentrations de SF<sub>6</sub> au poste 2 lors  
de l'application de la peinture**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
5	Number of samples (n)	10
<b>Sample Data</b>	Maximum (max)	24
(max n = 50)	Minimum (min)	0,114
No less-than (<)	Range	23,886
or greater-than (>)	Percent above OEL (%>OEL)	70,000
0,114	Mean	11,359
1,87	Median	7,930
23,4	Standard deviation (s)	9,388
7,67	Mean of logtransformed data (LN)	1,794
23,6	Std. deviation of logtransformed data (LN)	1,628
15	Geometric mean (GM)	6,014
5,6	Geometric standard deviation (GSD)	5,094
24	<b>TEST FOR DISTRIBUTION FIT</b>	
4,15	W-test of logtransformed data (LN)	0,811
8,19	Lognormal (a = 0.05)?	No
	W-test of data	0,862
	Normal (a = 0.05)?	Yes
	<b>LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	<b>Estimated Arithmetic Mean - MVUE</b>	17,843
	<b>95th Percentile</b>	87,544
	UTL <sub>95%,95%</sub>	687,601
	<b>Percent above OEL (%&gt;OEL)</b>	54,514
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	34,001
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	73,670
	<b>NORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	<b>Mean</b>	11,359
	LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	5,918
	UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	16,801
	<b>95th Percentile - Z</b>	26,802
	UTL <sub>95%,95%</sub>	38,69
	<b>Percent above OEL (%&gt;OEL)</b>	75,093

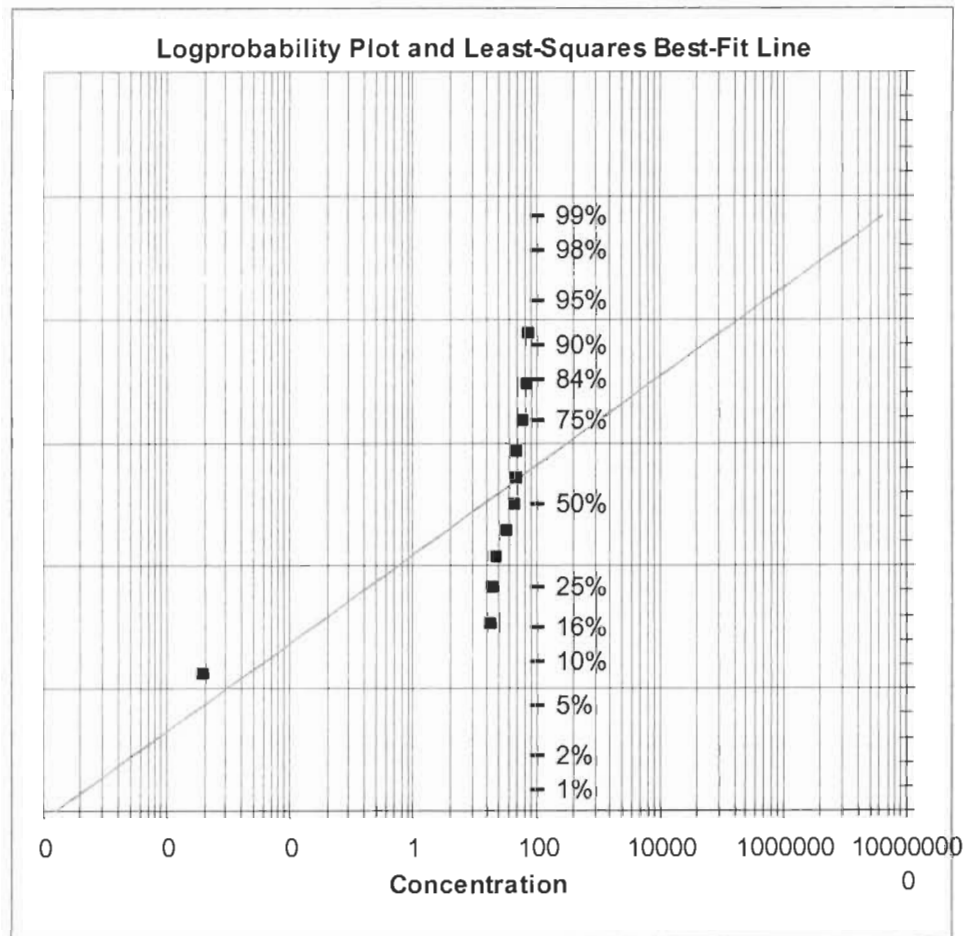
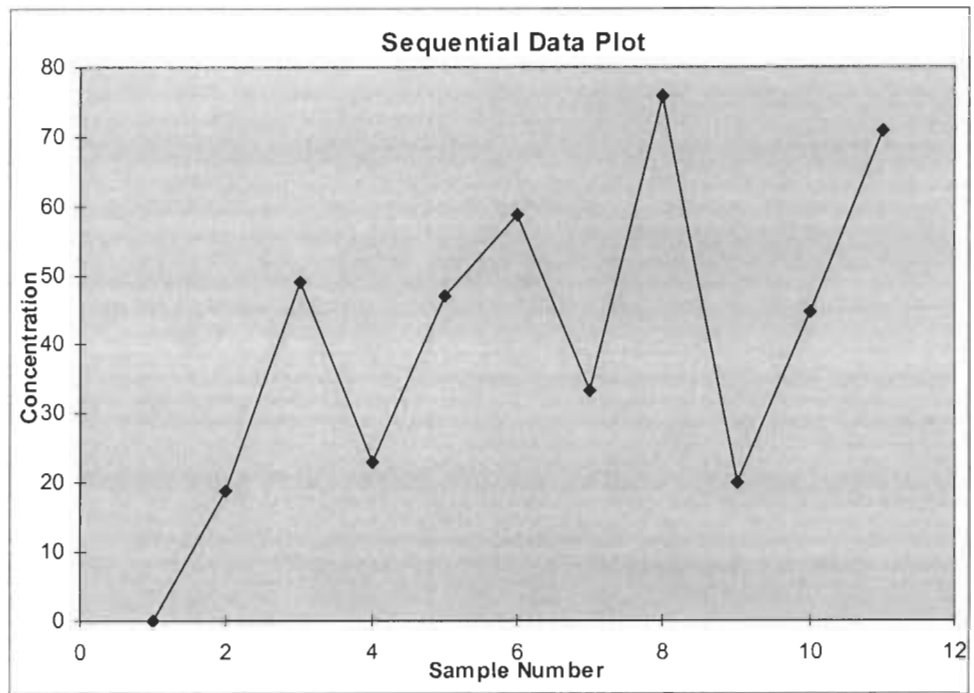


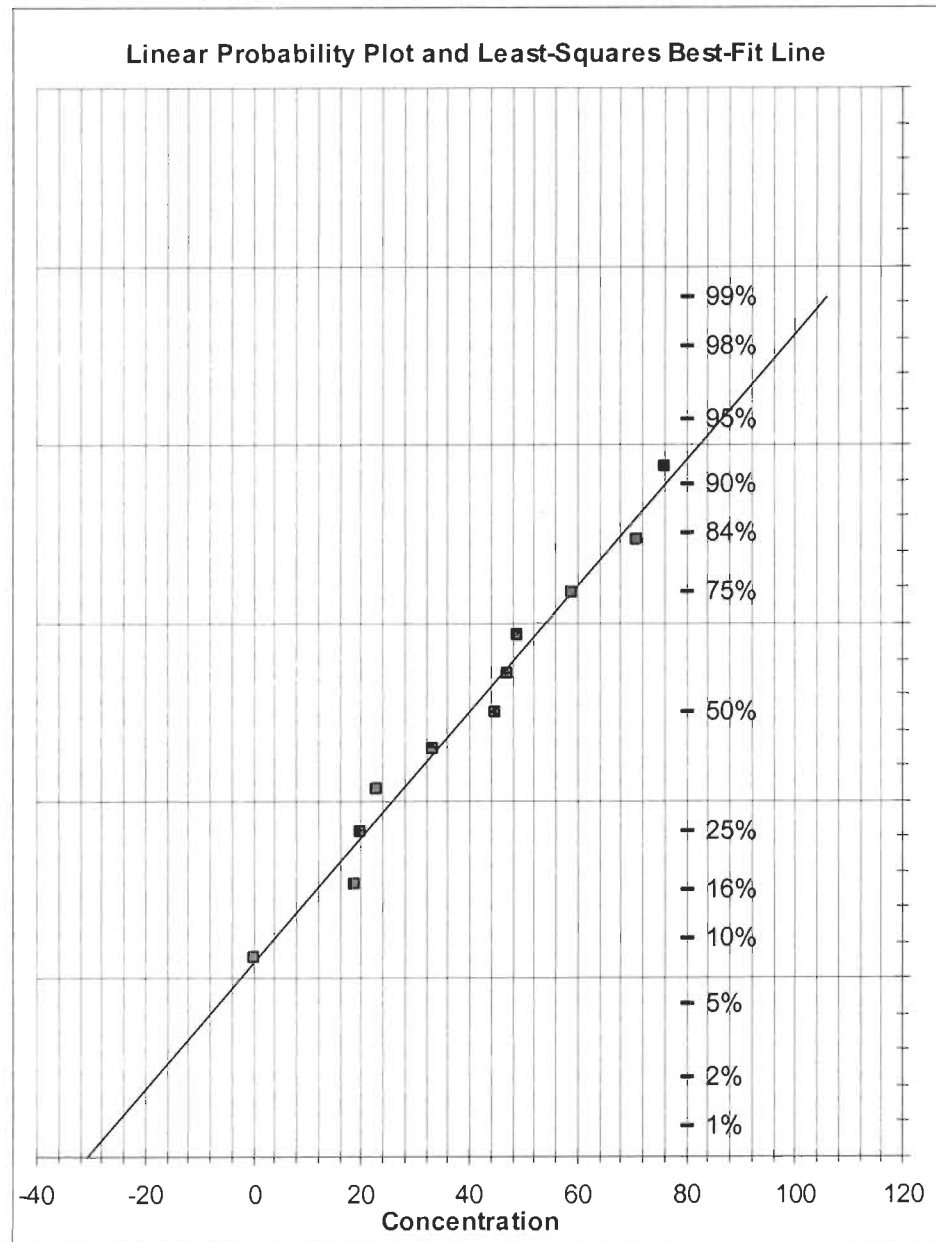


## ANNEXE J

**Cabine (B) : Statistiques des concentrations de SF<sub>6</sub> au poste 3 lors  
de l'application de la peinture**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
150	Number of samples (n)	11
<b>Sample Data</b>	Maximum (max)	76
(max n = 50)	Minimum (min)	0,000383
No less-than (<)	Range	75,999617
or greater-than (>)	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
0,000383	Mean	40,114
18,7	Median	44,800
49	Standard deviation (s)	23,530
23	Mean of logtransformed data (LN)	2,628
47	Std. deviation of logtransformed data (LN)	3,515
58,8	Geometric mean (GM)	13,840
33,2	Geometric standard deviation (GSD)	33,602
76	<b>TEST FOR DISTRIBUTION FIT</b>	
20	W-test of logtransformed data (LN)	0,474
44,8	Lognormal (a = 0.05)?	No
70,75	W-test of data	0,969
	Normal (a = 0.05)?	Yes
	<b>LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	<b>Estimated Arithmetic Mean - MVUE</b>	862,583
	LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	253,271
	UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	#####
	<b>95th Percentile</b>	4487,535
	UTL <sub>95%,95%</sub>	274069,386
	<b>Percent above OEL (%&gt;OEL)</b>	24,887
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	11,195
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	45,667
	<b>NORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	<b>Mean</b>	40,114
	LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	27,255
	UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	52,973
	<b>95th Percentile - Z</b>	78,821
	UTL <sub>95%,95%</sub>	106,35
	<b>Percent above OEL (%&gt;OEL)</b>	0,000

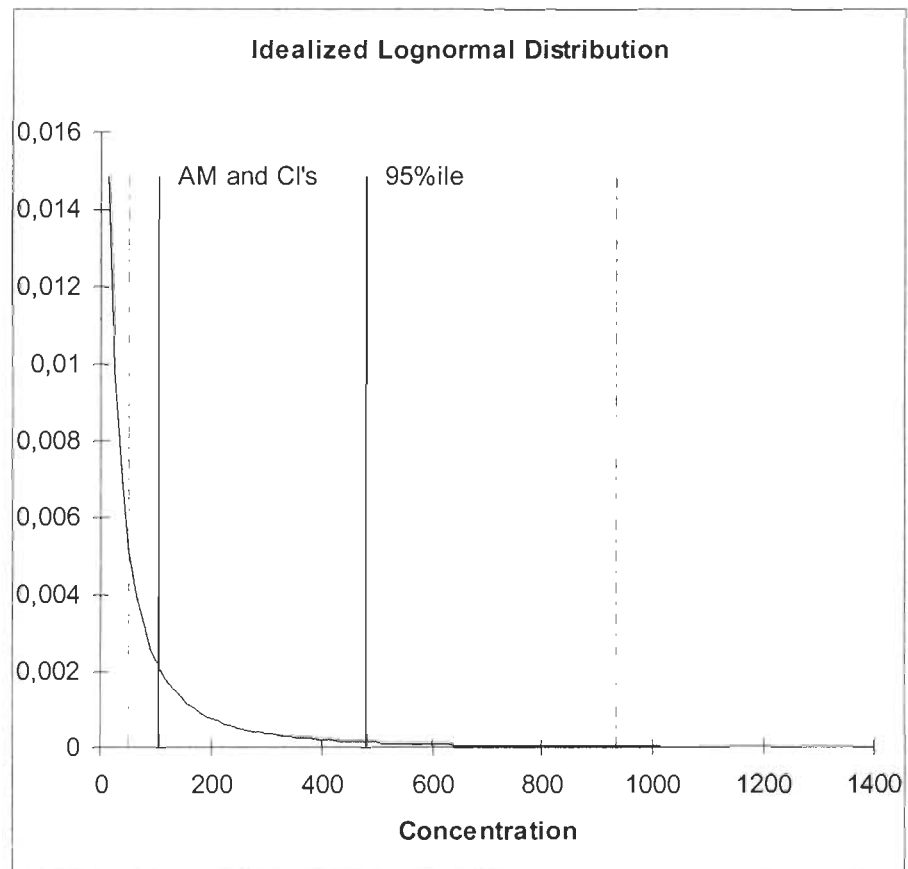
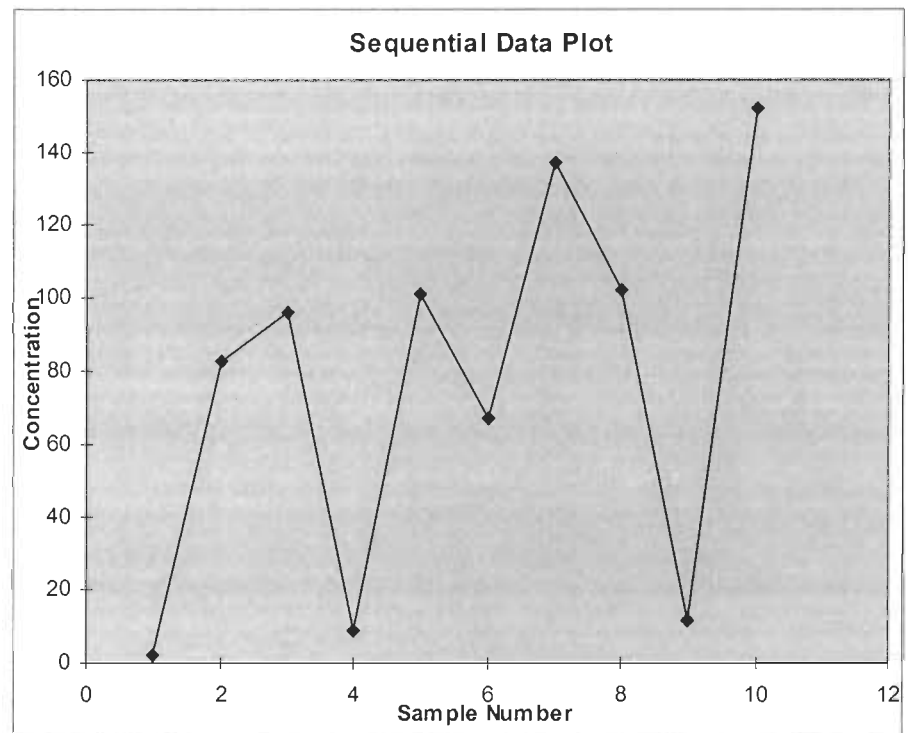




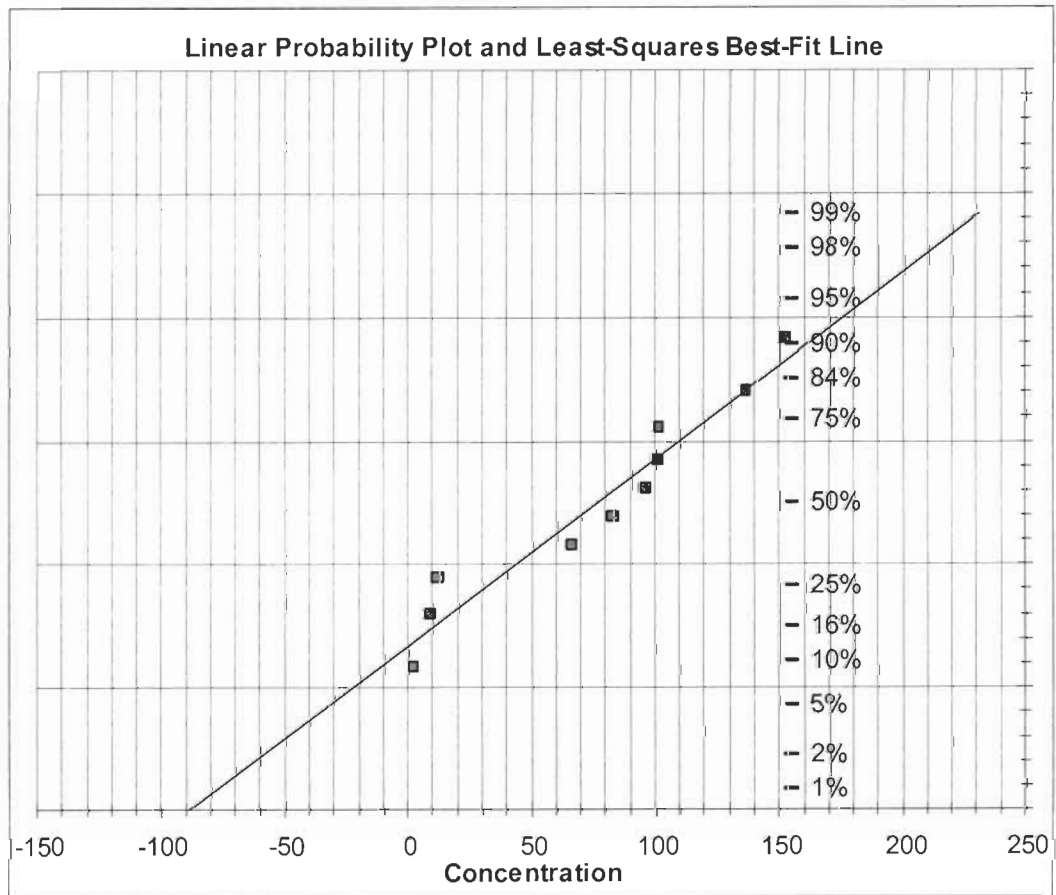
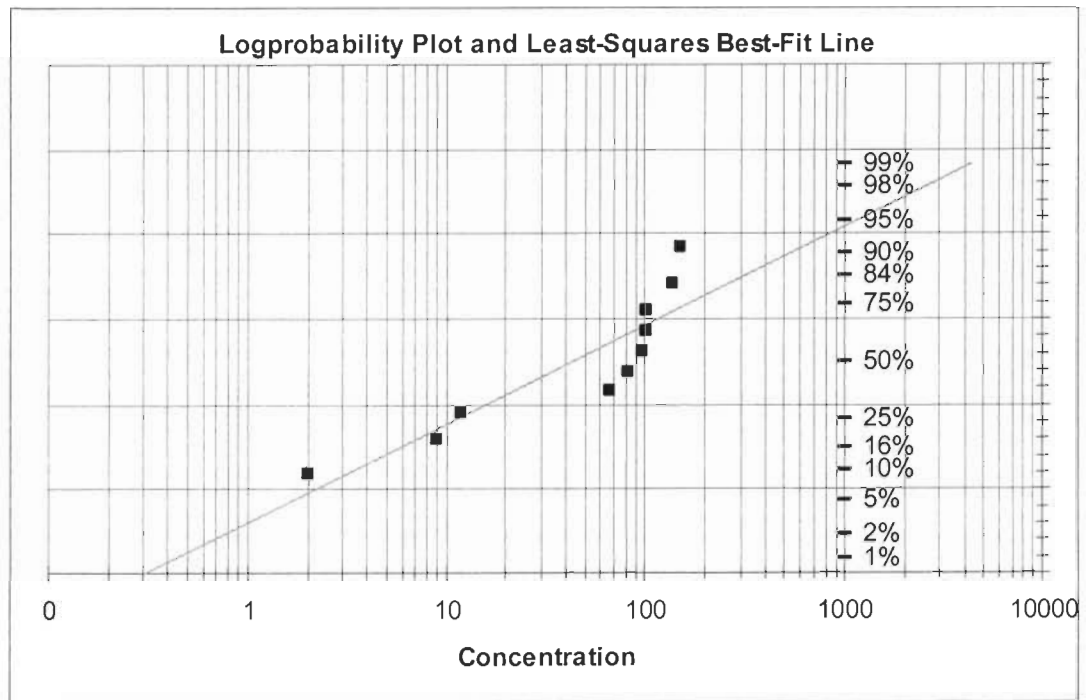
## ANNEXE K

**Cabine (B) : Statistiques des concentrations de SF<sub>6</sub> au poste 4 lors  
de l'application de la peinture**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
150	Number of samples (n)	10
<b>Sample Data</b>	Maximum (max)	152
(max n = 50)	Minimum (min)	2
No less-than (<)	Range	150
or greater-than (>)	Percent above OEL (%>OEL)	10,000
2	Mean	76,058
82,6	Median	89,450
96,3	Standard deviation (s)	53,164
8,88	Mean of logtransformed data (LN)	3,772
101	Std. deviation of logtransformed data (LN)	1,463
67	Geometric mean (GM)	43,446
137	Geometric standard deviation (GSD)	4,318
102	<b>TEST FOR DISTRIBUTION FIT</b>	
11,8	W-test of logtransformed data (LN)	0,791
152	Lognormal (a = 0.05)?	No
	W-test of data	0,911
	Normal (a = 0.05)?	Yes
	<b>LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	Estimated Arithmetic Mean - MVUE	106,001
	LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	52,230
	UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	932,324
	95th Percentile	481,925
	UTL <sub>95%,95%</sub>	3070,723
	Percent above OEL (%>OEL)	19,847
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	7,510
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	41,476
	<b>NORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	Mean	76,058
	LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	45,240
	UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	106,876
	95th Percentile - Z	163,512
	UTL <sub>95%,95%</sub>	230,82
	Percent above OEL (%>OEL)	8,214



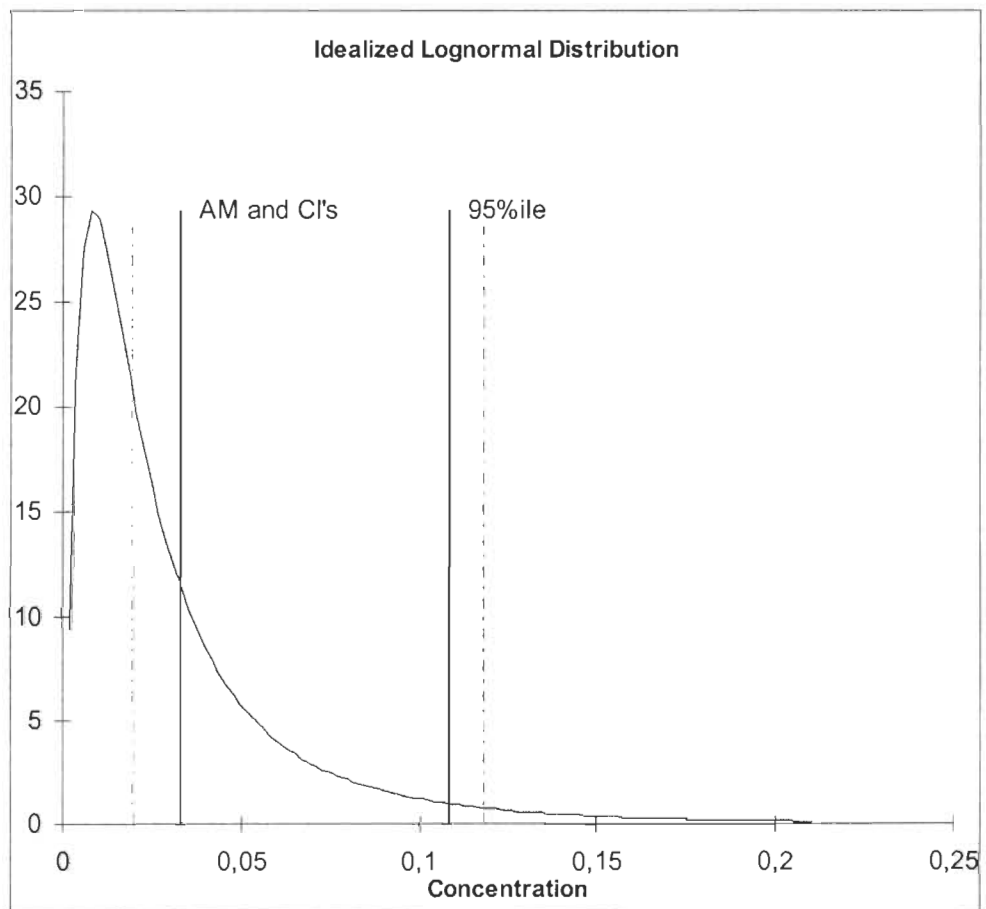
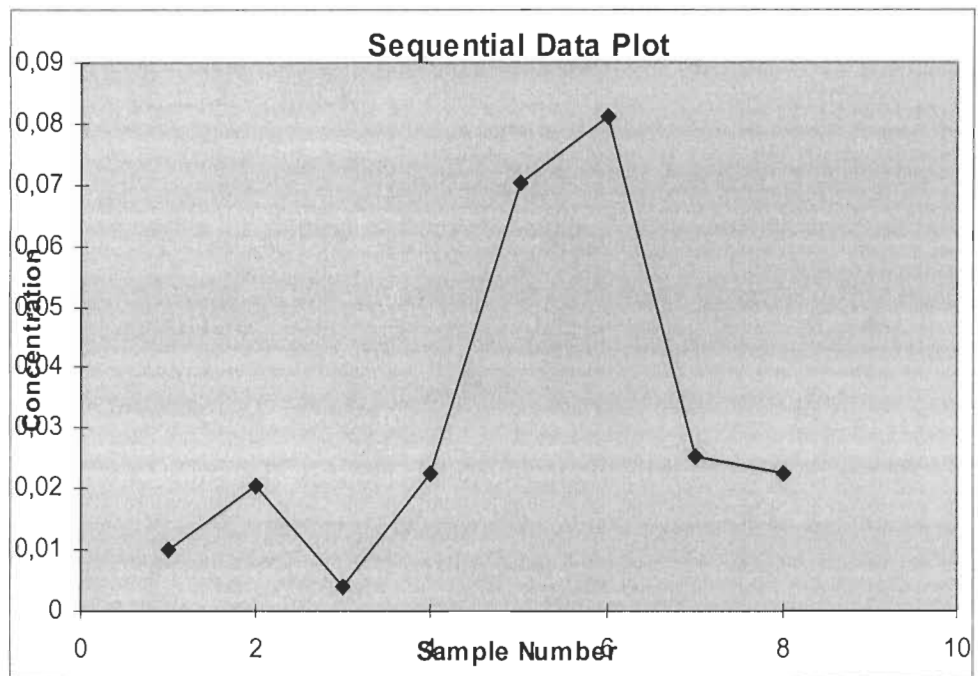


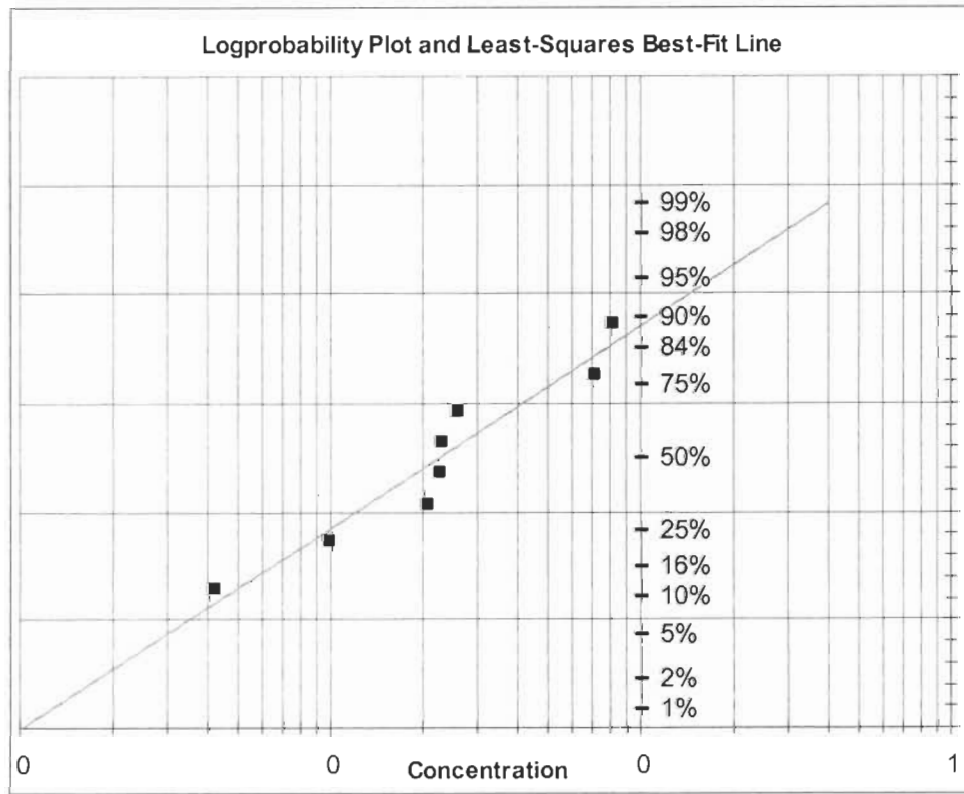
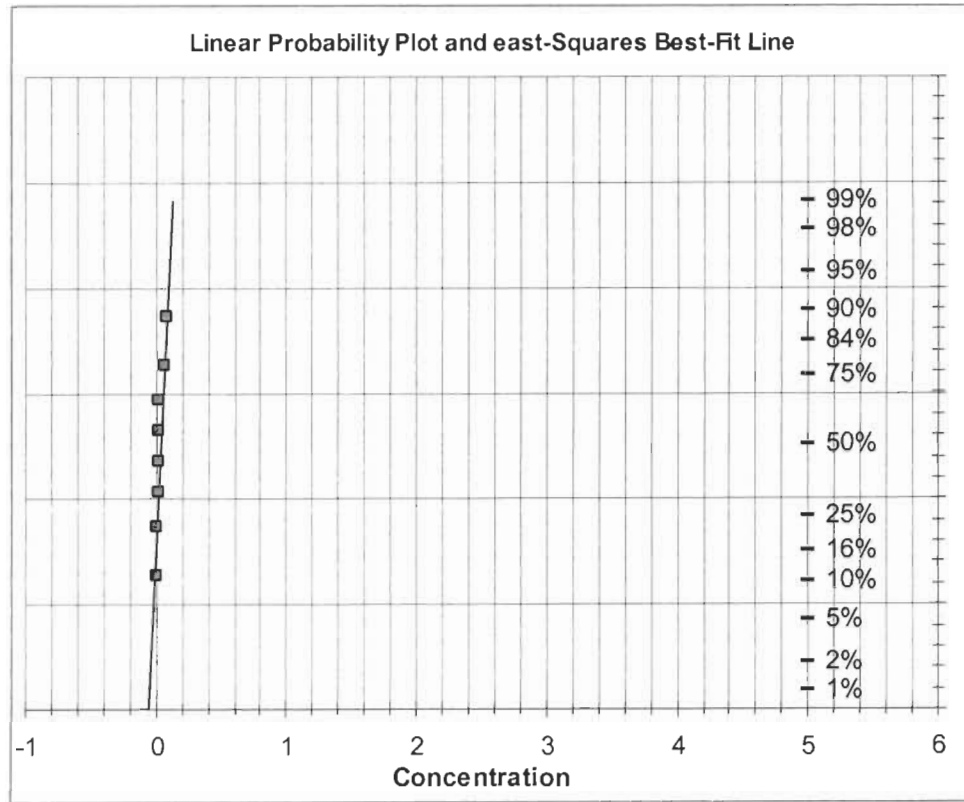


## ANNEXE L

**Cabine (B) : Statistiques des données d'échantillonnage de SF<sub>6</sub> sur le**  
**toit lors de l'application de la peinture**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
150	Number of samples (n)	8
<b>Sample Data</b>	Maximum (max)	0,0813
(max n = 50)	Minimum (min)	0,00421
No less-than (<)	Range	0,07709
or greater-than (>)	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
0,00992	Mean	0,032
0,02063	Median	0,022
0,00421	Standard deviation (s)	0,028
0,02266	Mean of logtransformed data (LN)	-3,798
0,0704	Std. deviation of logtransformed data (LN)	0,960
0,0813	Geometric mean (GM)	0,022
0,0255	Geometric standard deviation (GSD)	2,612
0,0223	<b>DESCRIPTIVE STATISTICS</b>	
	<b>TEST FOR DISTRIBUTION FIT</b>	
	W-test of logtransformed data (LN)	0,930
	Lognormal (a = 0.05)?	Yes
	W-test of data	0,805
	Normal (a = 0.05)?	No
	<b>LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	Estimated Arithmetic Mean - MVUE	0,033
	LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	0,020
	UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	0,118
	95th Percentile	0,109
	UTL <sub>95%,95%</sub>	0,478
	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0.1
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0,052
	<b>NORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	Mean	0,032
	LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	0,013
	UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	0,051
	95th Percentile - Z	0,078
	UTL <sub>95%,95%</sub>	0,12
	Percent above OEL (%>OEL)	0,000

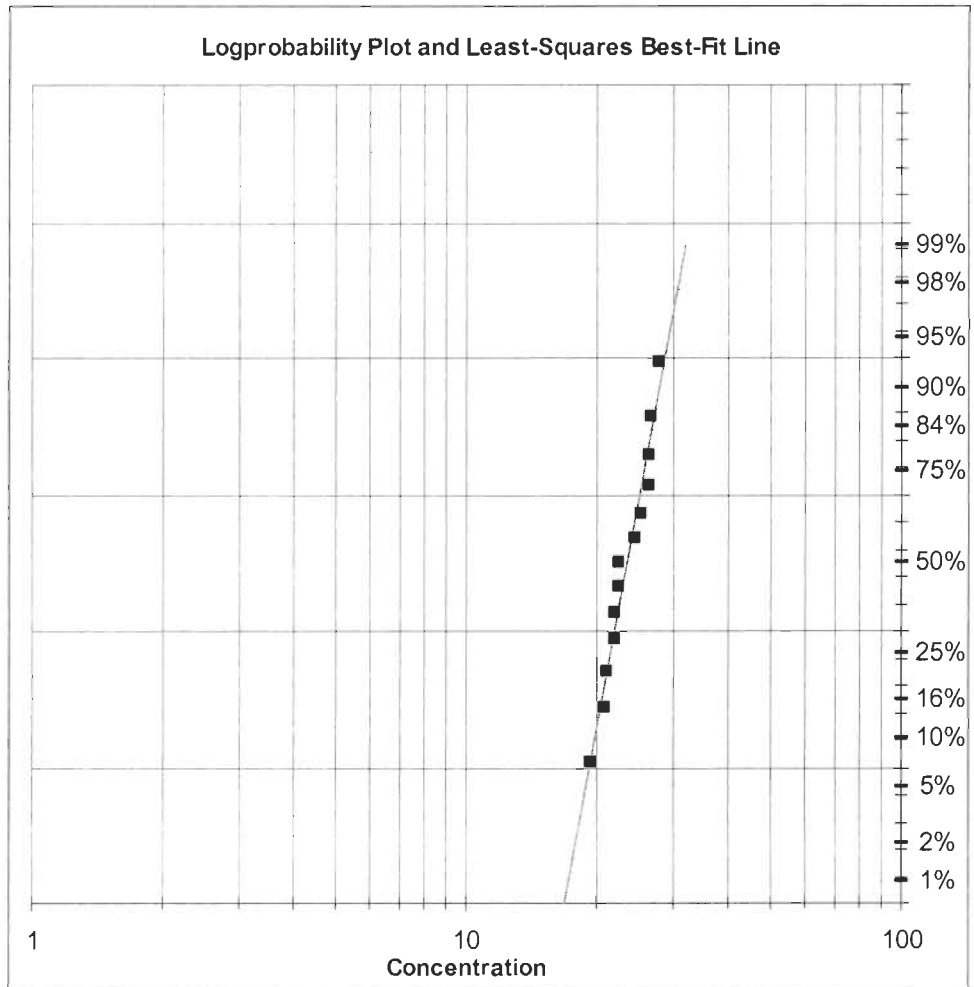
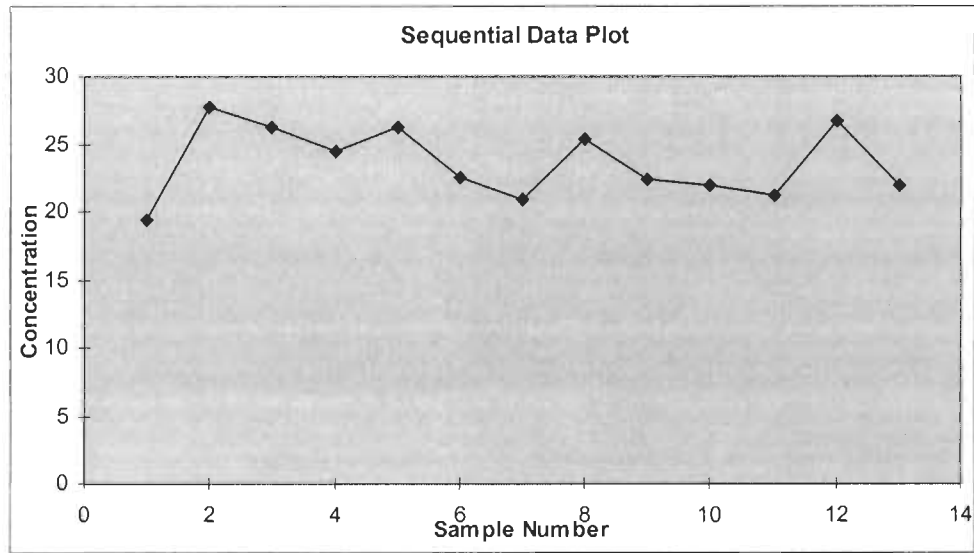


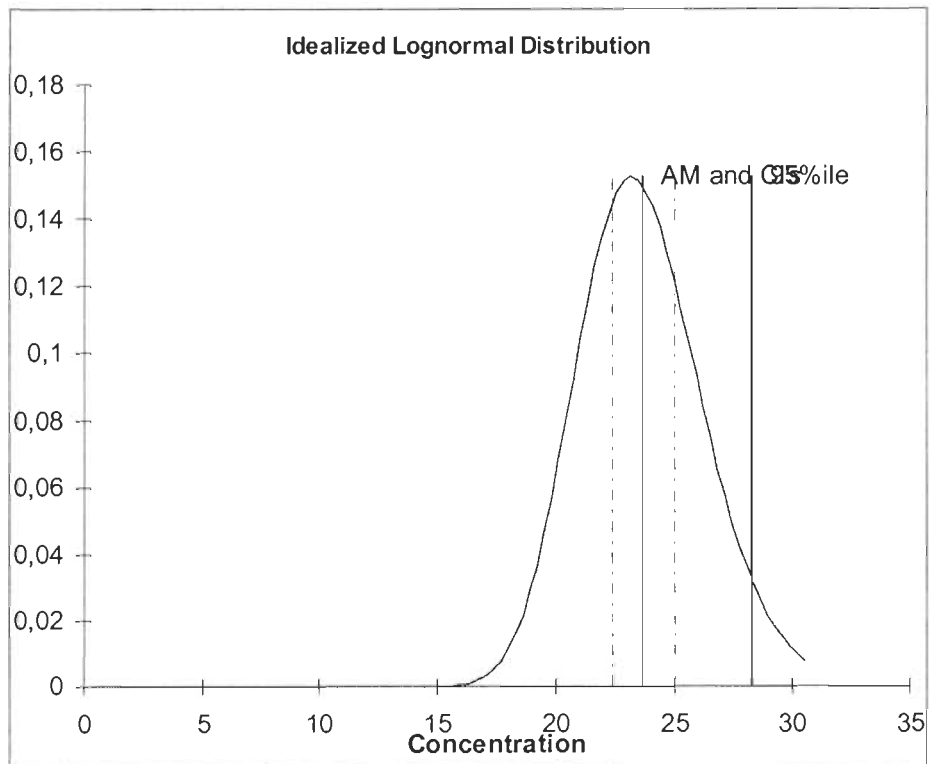
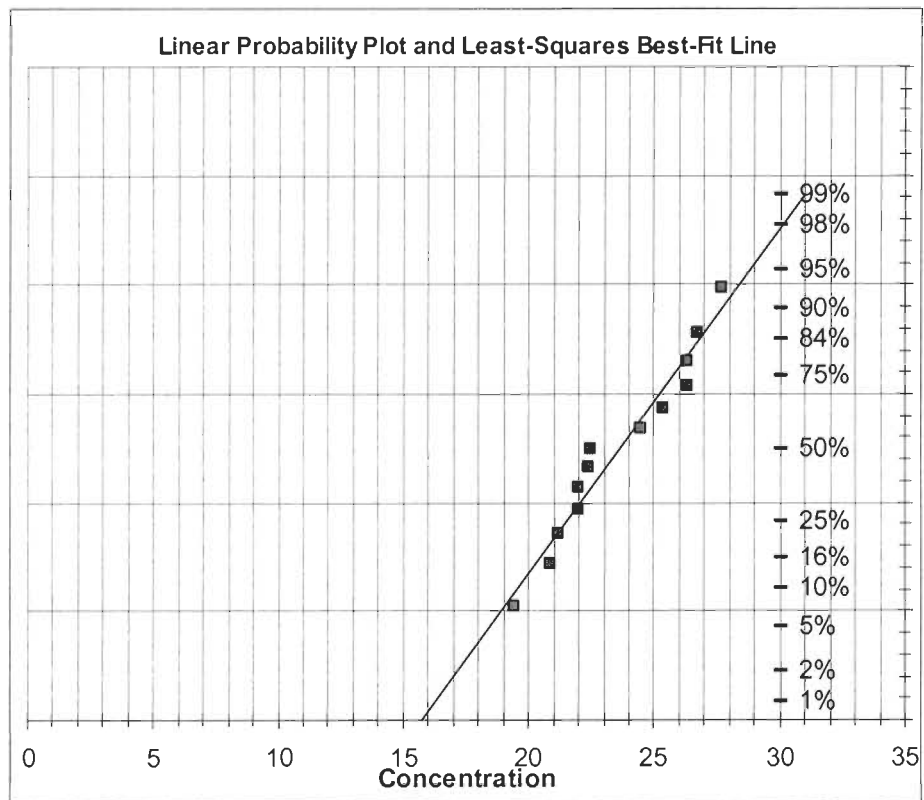


## ANNEXE M

**Cabine (B) : Statistiques des données d'échantillonnage de SF<sub>6</sub> dans la  
cheminée lors de l'application de la peinture**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
30	Number of samples (n)	13
<b>Sample Data</b>	Maximum (max)	27,7
(max n = 50)	Minimum (min)	19,4
No less-than (<)	Range	8,3
or greater-than (>)	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
19,4	Mean	23,638
27,7	Median	22,500
26,3	Standard deviation (s)	2,638
24,5	Mean of logtransformed data (LN)	3,157
26,3	Std. deviation of logtransformed data (LN)	0,112
22,5	Geometric mean (GM)	23,502
20,9	Geometric standard deviation (GSD)	1,118
25,4	<b>TEST FOR DISTRIBUTION FIT</b>	
22,4	W-test of logtransformed data (LN)	0,937
22	Lognormal (a = 0.05)?	Yes
21,2	W-test of data	0,933
26,7	Normal (a = 0.05)?	Yes
22	<b>LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	Estimated Arithmetic Mean - MVUE	23,639
	LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	22,407
	UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	25,027
	95th Percentile	28,256
	UTL <sub>95%,95%</sub>	31,693
	Percent above OEL (%>OEL)	1,463
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	0,131
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	9,725
	<b>NORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	Mean	23,638
	LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	22,335
	UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	24,942
	95th Percentile - Z	27,978
	UTL <sub>95%,95%</sub>	30,68
	Percent above OEL (%>OEL)	0,794



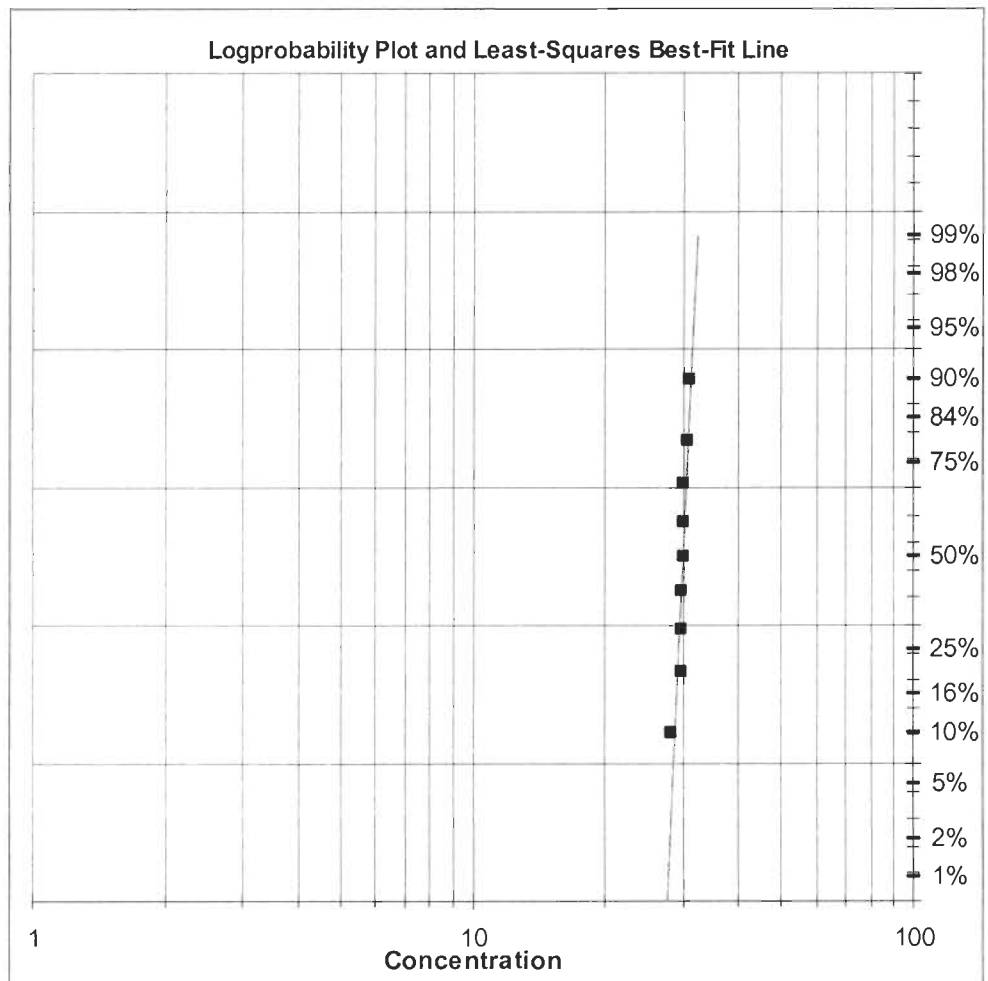
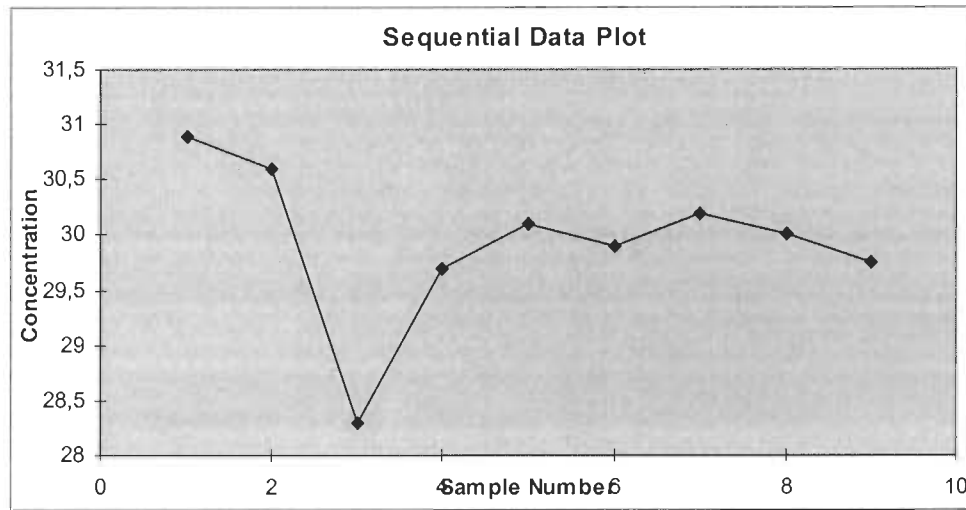


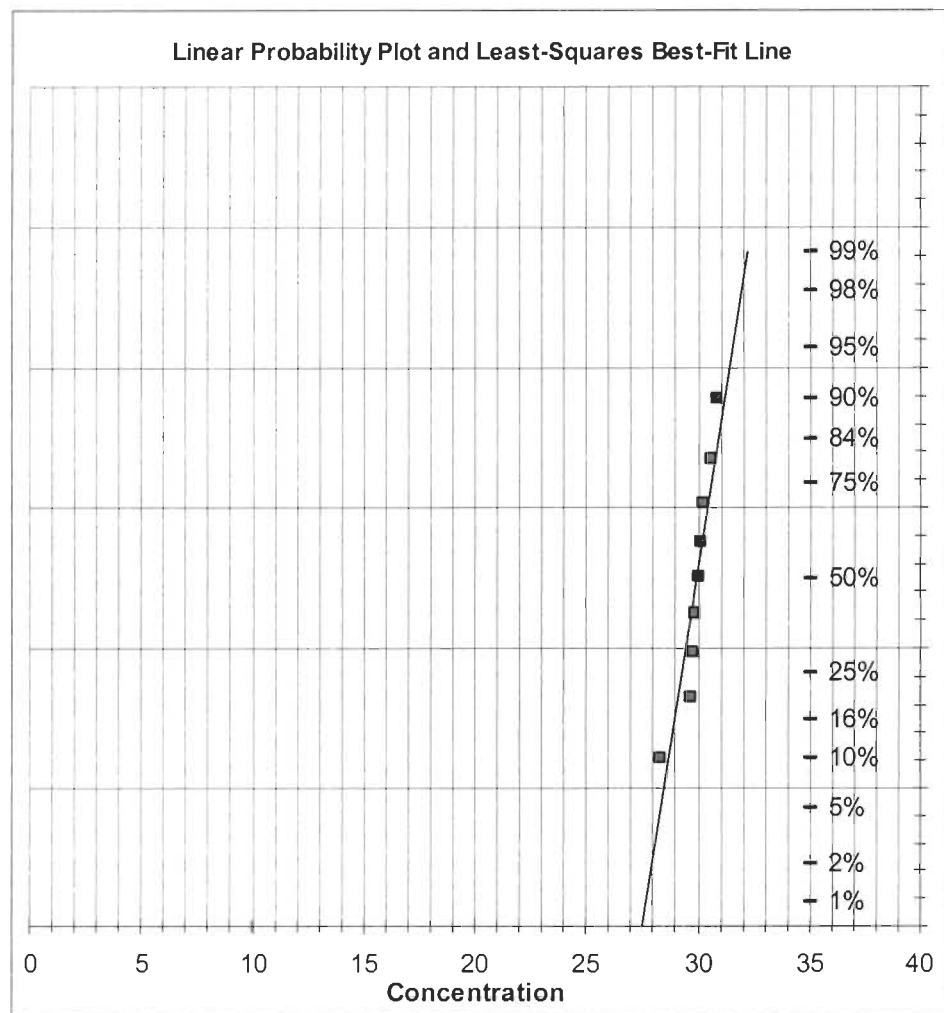
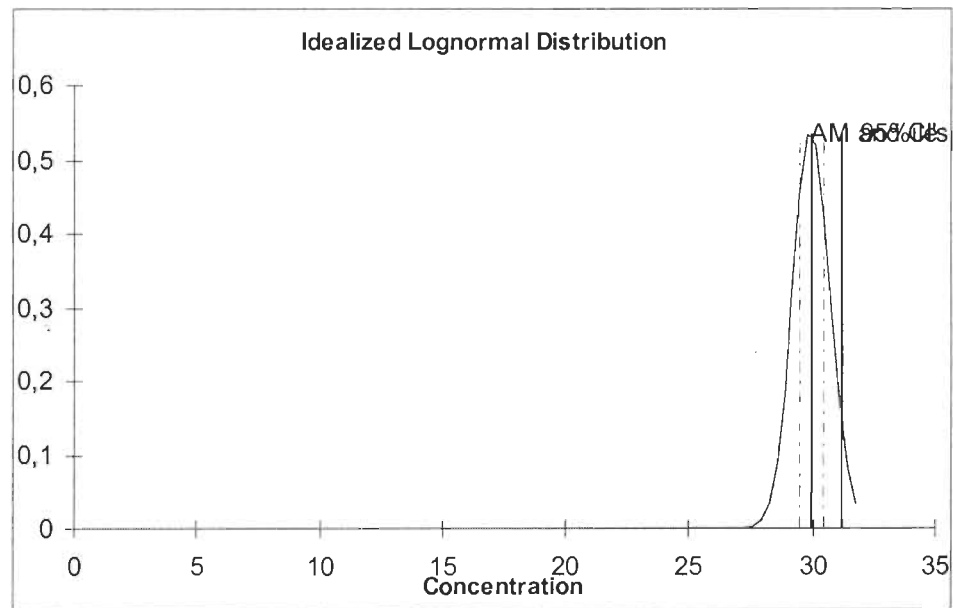
## ANNEXE N

**Cabine (B) : Statistiques des données d'échantillonnage de SF<sub>6</sub> dans la  
cheminée lors d'une injection directe dans le conduit d'extraction**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
30	Number of samples (n)	9
<b>Sample Data</b>	Maximum (max)	30,9
(max n = 50)	Minimum (min)	28,3
No less-than (<)	Range	2,6
or greater-than (>)	Percent above OEL (%>OEL)	44,444
30,9	Mean	29,939
30,6	Median	30,000
28,3	Standard deviation (s)	0,728
29,7	Mean of logtransformed data (LN)	3,399
30,1	Std. deviation of logtransformed data (LN)	0,025
29,9	Geometric mean (GM)	29,931
30,2	Geometric standard deviation (GSD)	1,025
30	DESCRIPTIVE STATISTICS	
29,75	TEST FOR DISTRIBUTION FIT	
	W-test of logtransformed data (LN)	0,871
	Lognormal (a = 0.05)?	Yes
	DESCRIPTIVE STATISTICS	
	W-test of data	0,879
	Normal (a = 0.05)?	Yes
	DESCRIPTIVE STATISTICS	
	LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS	
	Estimated Arithmetic Mean - MVUE	29,939
	LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	29,490
	UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	30,403
	95th Percentile	31,169
	UTL <sub>95%,95%</sub>	32,252
	Percent above OEL (%>OEL)	46,271
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	26,067
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	67,684
	NORMAL PARAMETRIC STATISTICS	
	Mean	29,939
	LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	29,488
	UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	30,390
	95th Percentile - Z	31,136
	UTL <sub>95%,95%</sub>	32,15
	Percent above OEL (%>OEL)	46,655



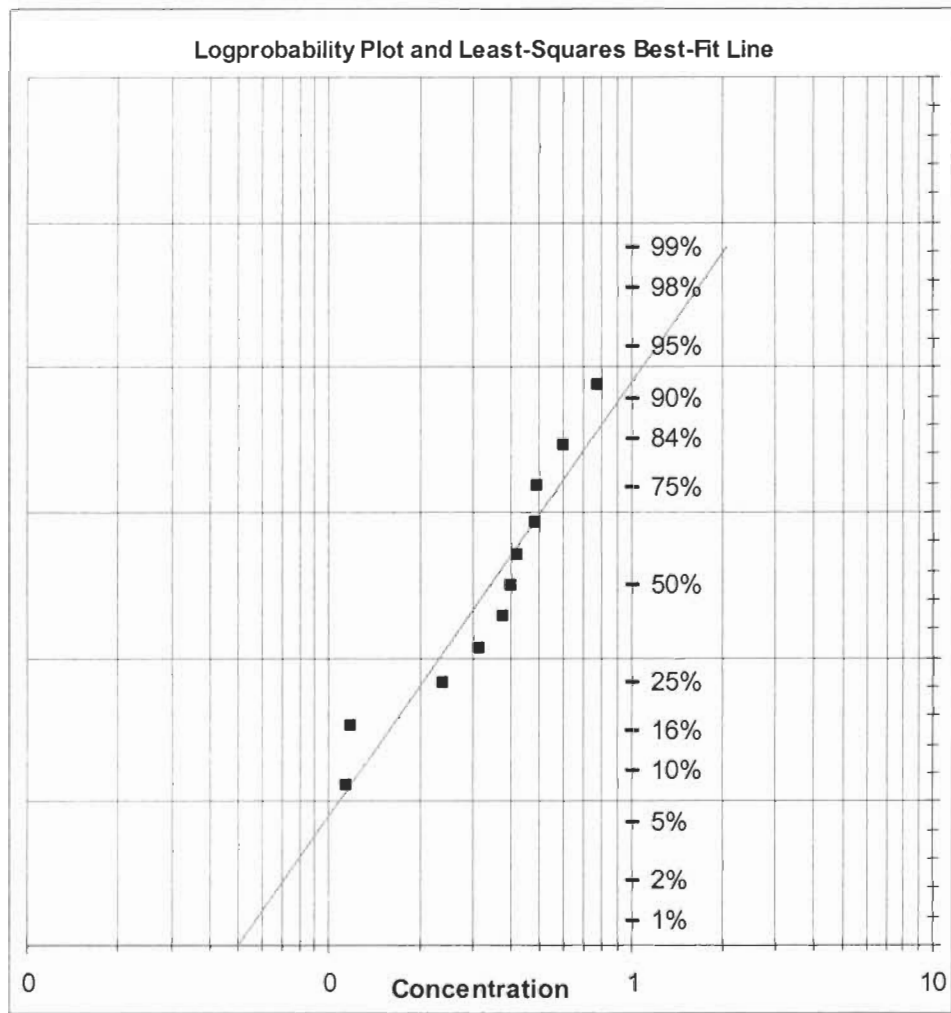
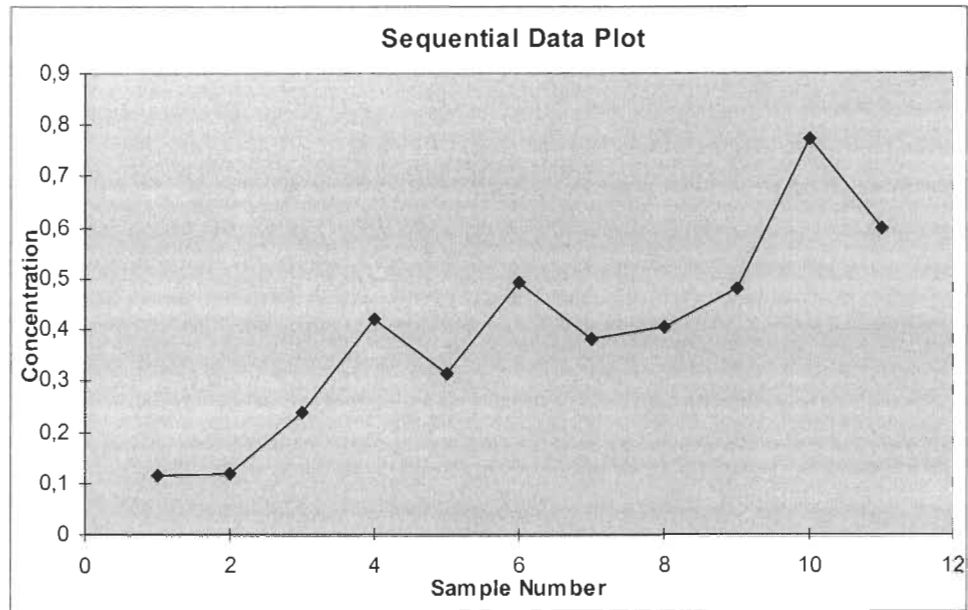


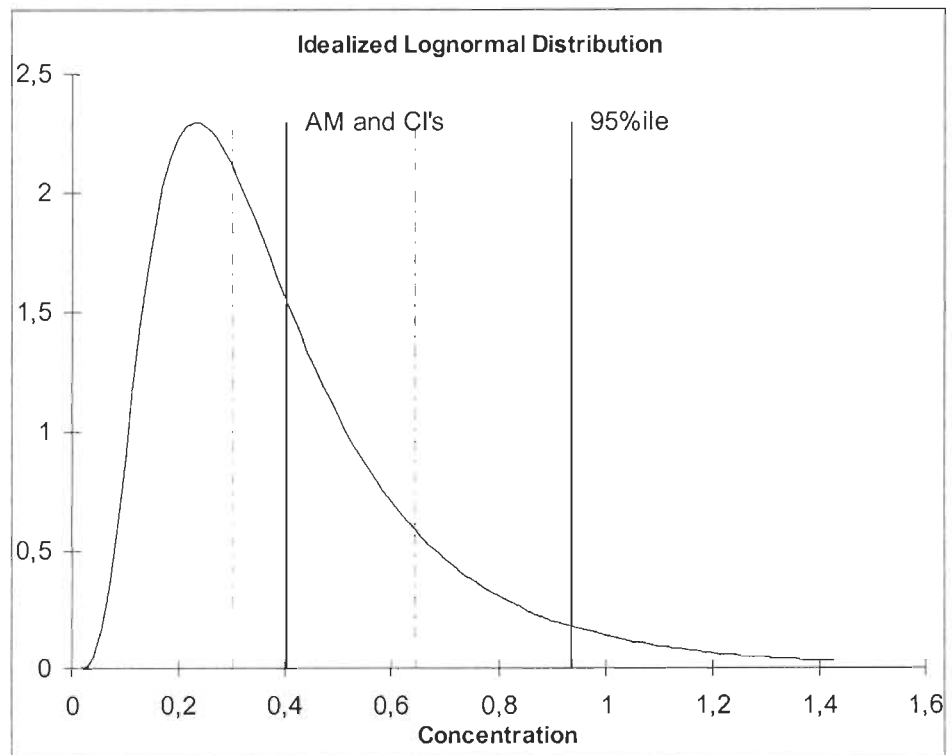
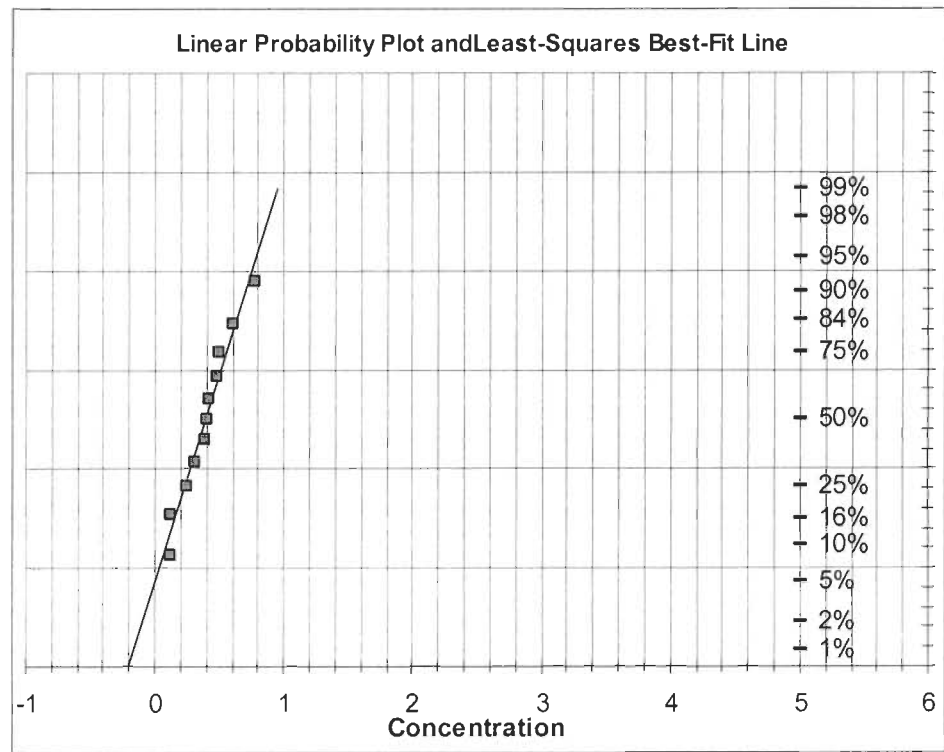


## ANNEXE O

**Cabine (C) : Statistiques des données d'échantillonnage de SF<sub>6</sub> au poste 1**  
**lors de l'application de la peinture**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
30	Number of samples (n)	11
<b>Sample Data</b>	Maximum (max)	0,774
(max n = 50)	Minimum (min)	0,115
No less-than (<)	Range	0,659
or greater-than (>)	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
0,115	Mean	0,394
0,117	Median	0,404
0,2395	Standard deviation (s)	0,197
0,4195	Mean of logtransformed data (LN)	-1,077
0,314	Std. deviation of logtransformed data (LN)	0,615
0,49	Geometric mean (GM)	0,340
0,38	Geometric standard deviation (GSD)	1,850
0,404	<b>TEST FOR DISTRIBUTION FIT</b>	
0,481	W-test of logtransformed data (LN)	0,895
0,774	Lognormal (a = 0.05)?	Yes
0,6	W-test of data	0,963
	Normal (a = 0.05)?	Yes
	<b>LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	<b>Estimated Arithmetic Mean - MVUE</b>	0,403
	LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	0,300
	UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	0,644
	<b>95th Percentile</b>	0,936
	UTL <sub>95%,95%</sub>	1,923
	<b>Percent above OEL (%&gt;OEL)</b>	0,000
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0.1
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0,000
	<b>NORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	<b>Mean</b>	0,394
	LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	0,286
	UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	0,502
	<b>95th Percentile - Z</b>	0,719
	UTL <sub>95%,95%</sub>	0,95
	<b>Percent above OEL (%&gt;OEL)</b>	0,000

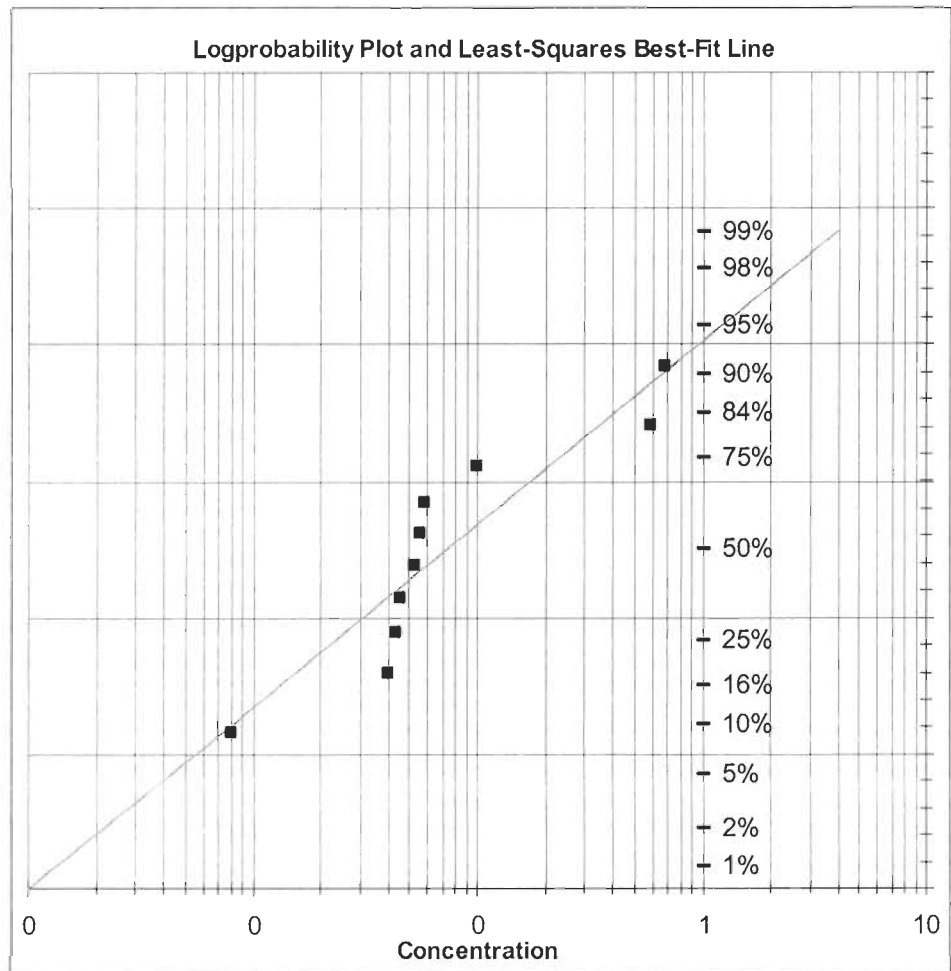
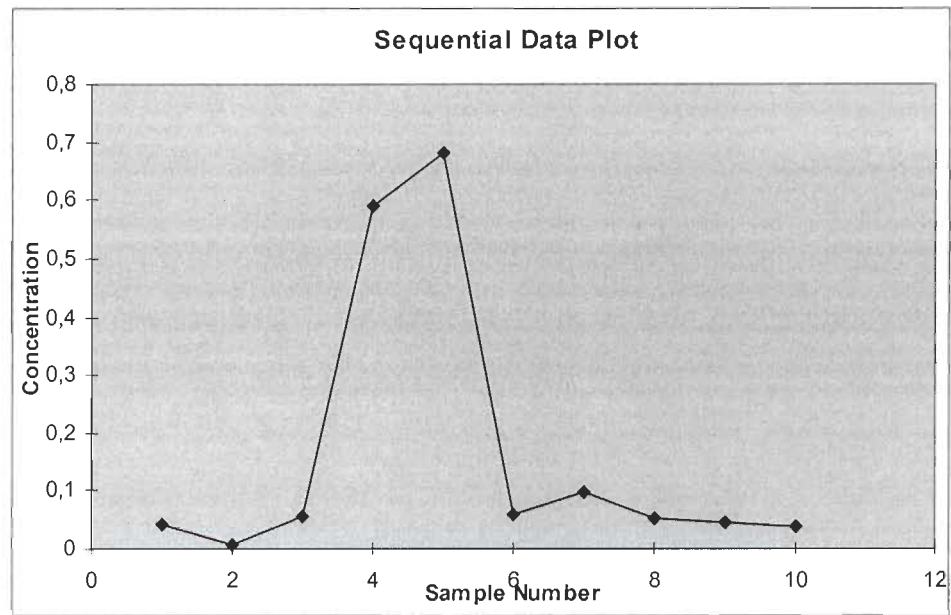


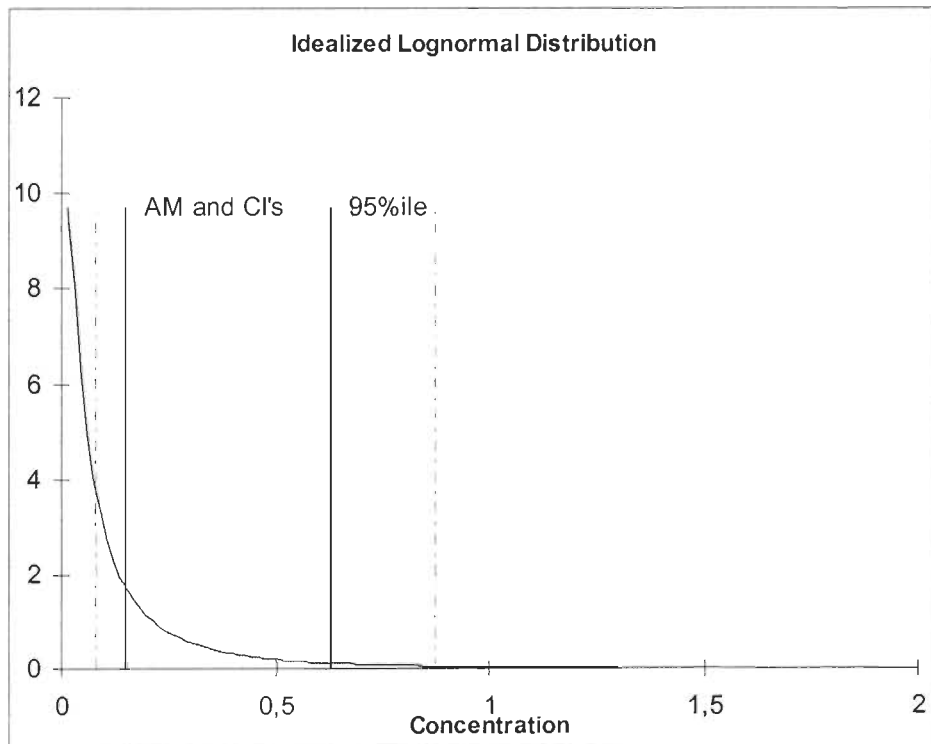
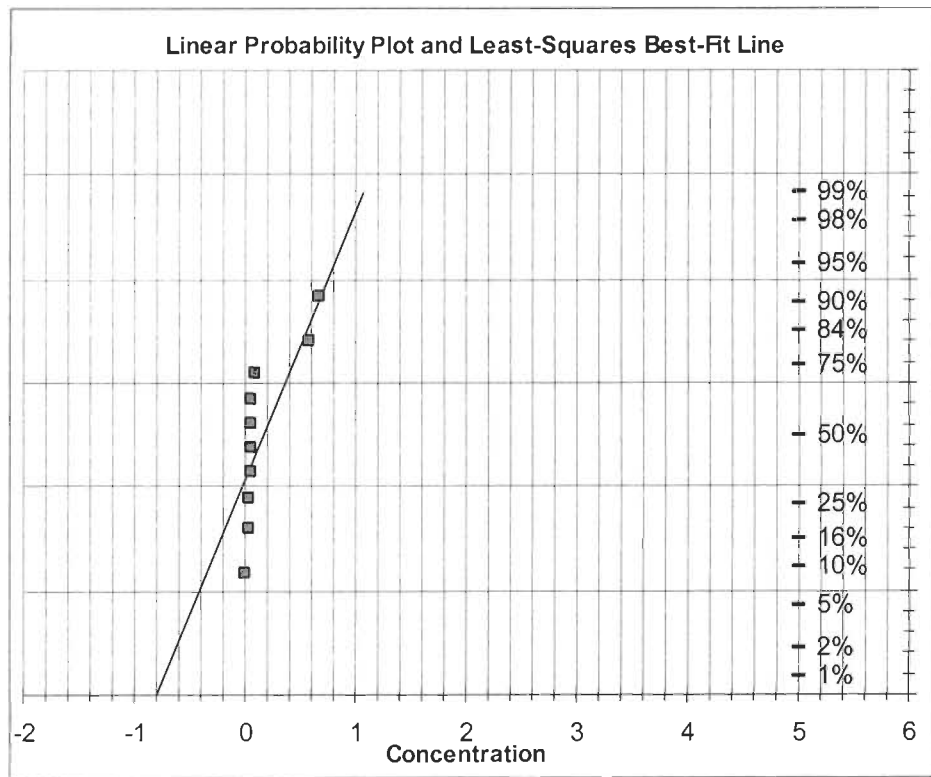


## ANNEXE P

**Cabine (C) : Statistiques des données d'échantillonnage de SF<sub>6</sub> au  
poste 2 lors de l'application de la peinture**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
30	Number of samples (n)	10
<b>Sample Data</b>	Maximum (max)	0,68
(max n = 50)	Minimum (min)	0,0081
No less-than (<)	Range	0,6719
or greater-than (>)	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
0,0434	Mean	0,167
0,0081	Median	0,055
0,056	Standard deviation (s)	0,248
0,59	Mean of logtransformed data (LN)	-2,614
0,68	Std. deviation of logtransformed data (LN)	1,306
0,058	Geometric mean (GM)	0,073
0,099	Geometric standard deviation (GSD)	3,690
0,053	<b>TEST FOR DISTRIBUTION FIT</b>	
0,046	W-test of logtransformed data (LN)	0,861
0,04	Lognormal (a = 0.05)?	Yes
	W-test of data	0,606
	Normal (a = 0.05)?	No
	<b>LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	Estimated Arithmetic Mean - MVUE	0,151
	LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	0,080
	UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	0,873
	95th Percentile	0,627
	UTL <sub>95%,95%</sub>	3,276
	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0.1
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	0,267
	<b>NORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	Mean	0,167
	LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	0,023
	UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	0,311
	95th Percentile - Z	0,576
	UTL <sub>95%,95%</sub>	0,89
	Percent above OEL (%>OEL)	0,000



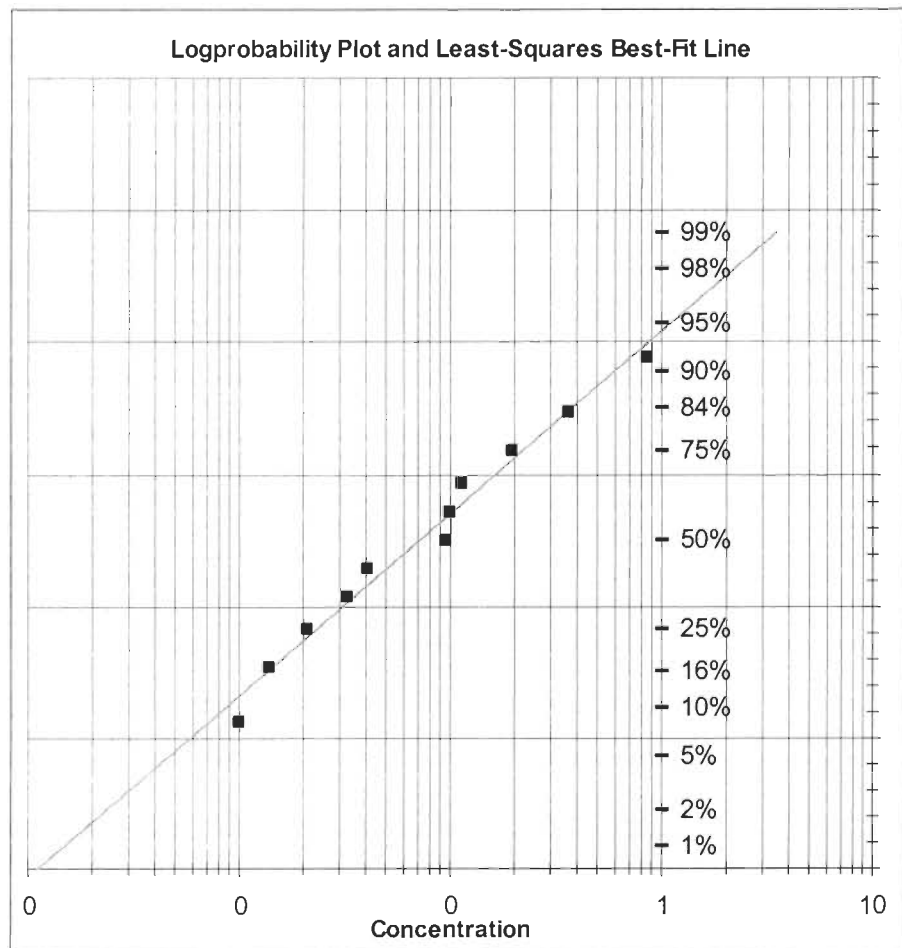
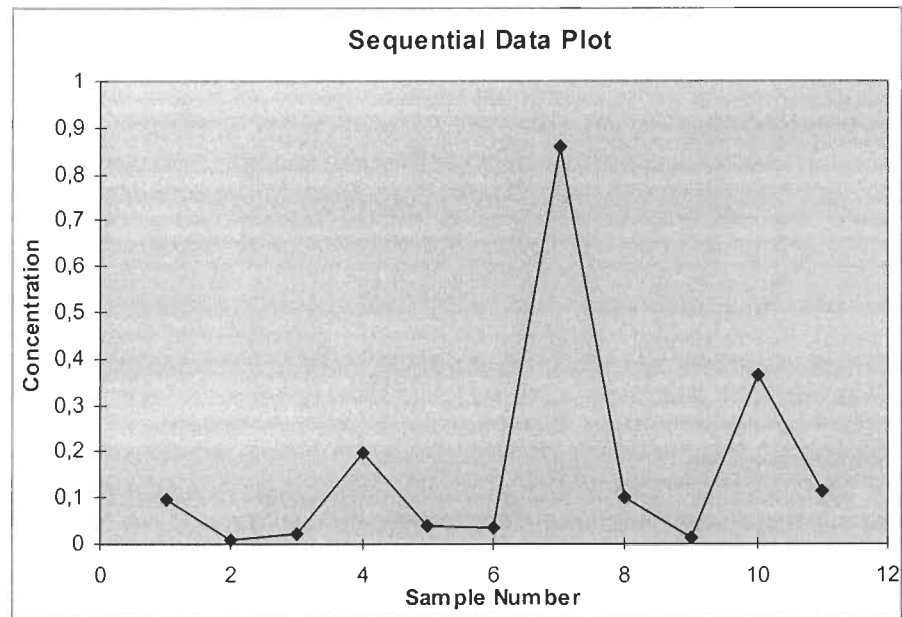


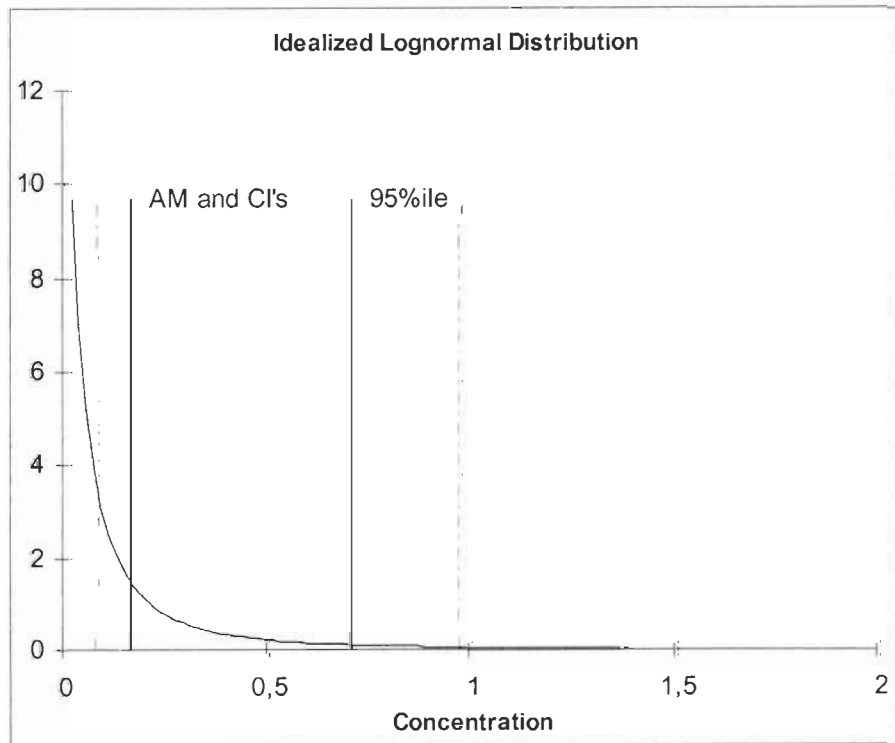
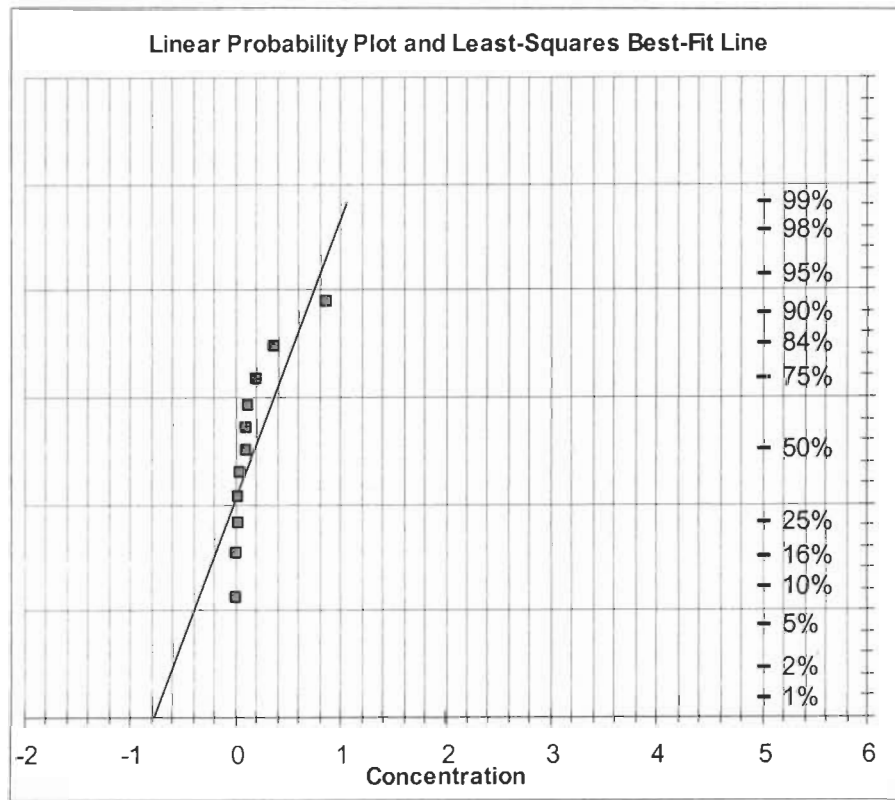


## ANNEXE Q

**Cabine (C) : Statistiques des données d'échantillonnage de SF<sub>6</sub> au  
poste 3 lors de l'application de la peinture**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
30	Number of samples (n)	11
<b>Sample Data</b>	Maximum (max)	0,86
(max n = 50)	Minimum (min)	0,01
No less-than (<)	Range	0,85
or greater-than (>)	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
0,095	Mean	0,168
0,01	Median	0,095
0,021	Standard deviation (s)	0,252
0,199	Mean of logtransformed data (LN)	-2,631
0,041	Std. deviation of logtransformed data (LN)	1,387
0,033	Geometric mean (GM)	0,072
0,86	Geometric standard deviation (GSD)	4,001
0,101	<b>TEST FOR DISTRIBUTION FIT</b>	
0,014	W-test of logtransformed data (LN)	0,971
0,364	Lognormal (a = 0.05)?	Yes
0,113	W-test of data	0,660
	Normal (a = 0.05)?	No
	<b>LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	Estimated Arithmetic Mean - MVUE	0,163
	LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	0,085
	UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	0,977
	95th Percentile	0,704
	UTL <sub>95%,95%</sub>	3,568
	Percent above OEL (%>OEL)	0,001
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0.1
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	0,345
	<b>NORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	Mean	0,168
	LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	0,030
	UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	0,306
	95th Percentile - Z	0,583
	UTL <sub>95%,95%</sub>	0,88

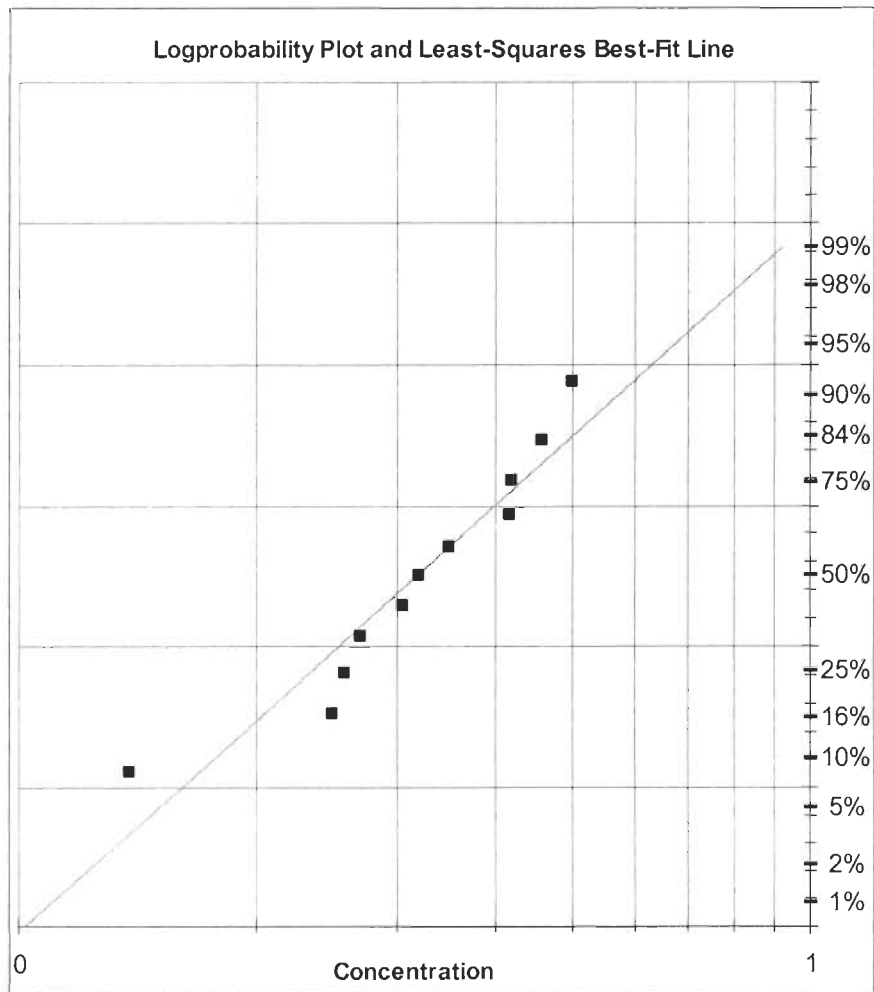
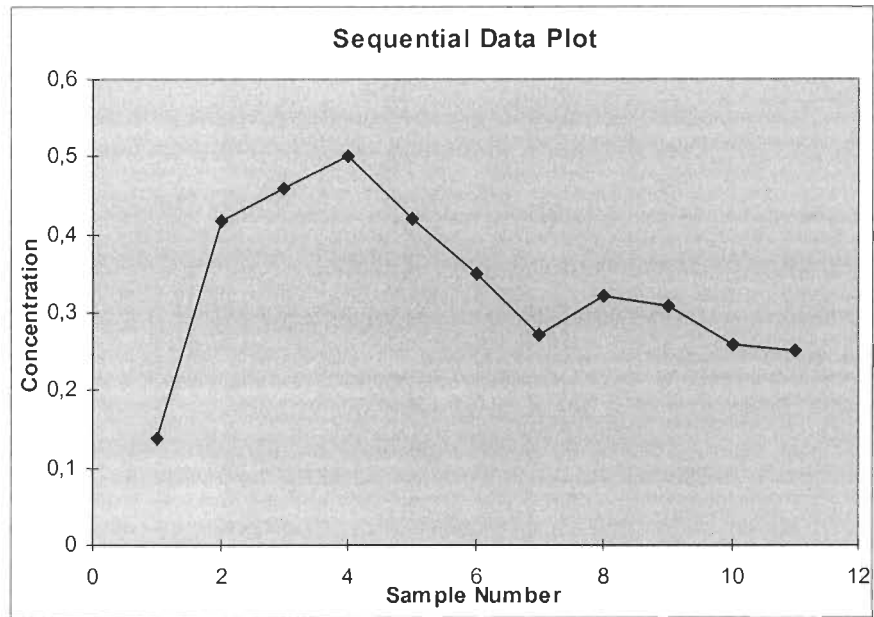


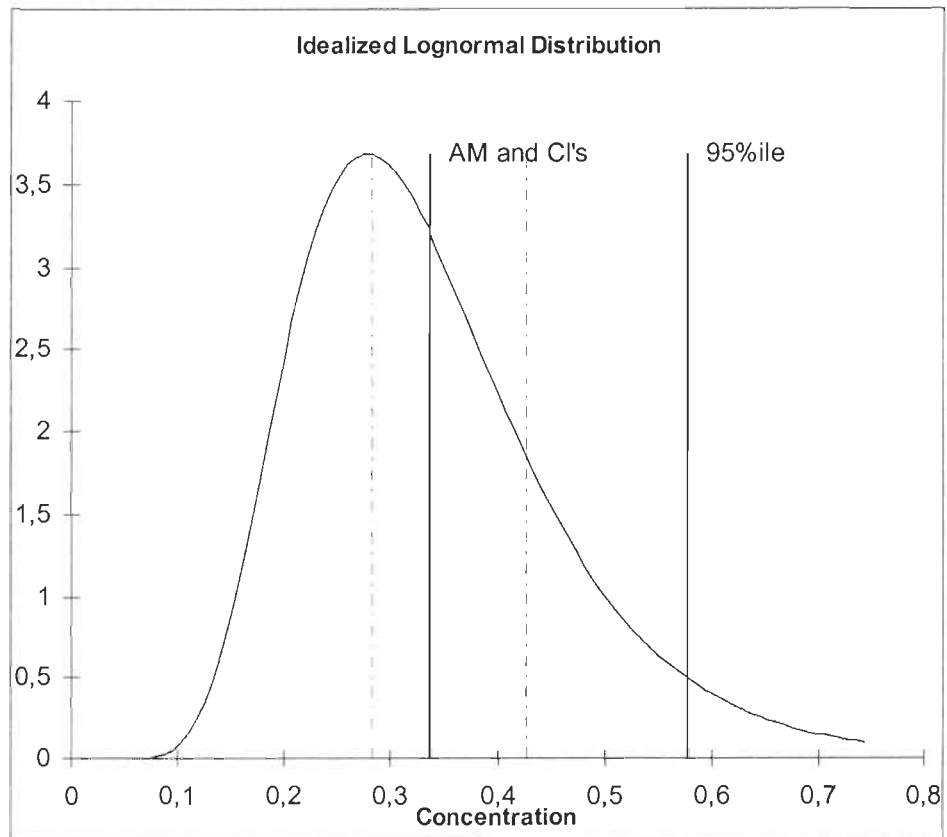
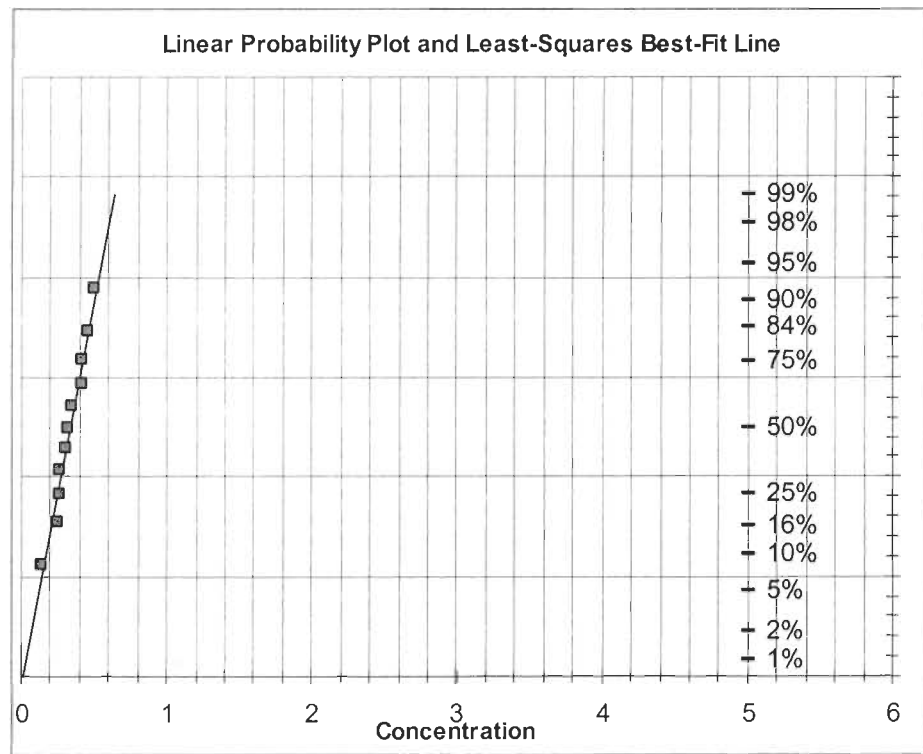


## ANNEXE R

**Cabine (C) : Statistiques des données d'échantillonnage de SF<sub>6</sub> au  
poste 4 lors de l'application de la peinture**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
30	Number of samples (n)	11
<b>Sample Data</b>	Maximum (max)	0,5
(max n = 50)	Minimum (min)	0,138
No less-than (<)	Range	0,362
or greater-than (>)	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
0,138	Mean	0,336
0,417	Median	0,321
0,46	Standard deviation (s)	0,107
0,5	Mean of logtransformed data (LN)	-1,146
0,42	Std. deviation of logtransformed data (LN)	0,364
0,35	Geometric mean (GM)	0,318
0,27	Geometric standard deviation (GSD)	1,439
0,321	<b>TEST FOR DISTRIBUTION FIT</b>	
0,307	W-test of logtransformed data (LN)	0,919
0,259	Lognormal (a = 0.05)?	Yes
0,25		
	W-test of data	0,971
	Normal (a = 0.05)?	Yes
	<b>LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	Estimated Arithmetic Mean - MVUE	0,338
	LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	0,282
	UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	0,427
	95th Percentile	0,579
	UTL <sub>95%,95%</sub>	0,886
	Percent above OEL (%>OEL)	0,000
	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0.1
	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	<0,000
	<b>NORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
	Mean	0,336
	LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	0,277
	UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	0,394
	95th Percentile - Z	0,511
	UTL <sub>95%,95%</sub>	0,64





## ANNEXE S

**Cabine (C) : Statistiques des données d'échantillonnage de SF<sub>6</sub>**  
**dans la cheminée lors de l'application de la peinture**

OEL	DESCRIPTIVE STATISTICS	
30	Number of samples (n)	25
<b>Sample Data</b>	Maximum (max)	50,9
(max n = 50)	Minimum (min)	20,7
No less-than (<)	Range	30,2
or greater-than (>)	Percent above OEL (%>OEL)	60,000
24,4	Mean	34,236
21	Median	33,700
29,5	Standard deviation (s)	9,072
43,8	Mean of logtransformed data (LN)	3,499
33,9	Std. deviation of logtransformed data (LN)	0,269
20,7	Geometric mean (GM)	33,080
28,6	Geometric standard deviation (GSD)	1,309
23,5	<b>TEST FOR DISTRIBUTION FIT</b>	
28,4	W-test of logtransformed data (LN)	0,960
39,2	Lognormal (a = 0.05)?	Yes
33,2	W-test of data	0,954
36,6	Normal (a = 0.05)?	Yes
33,7	<b>LOGNORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
29,6	Estimated Arithmetic Mean - MVUE	34,252
24,6	LCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	31,358
46,2	UCL <sub>1,95%</sub> - Land's "Exact"	37,819
36,3	95th Percentile	51,532
39,5	UTL <sub>95%,95%</sub>	61,347
48,7	Percent above OEL (%>OEL)	64,160
23,8	LCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	50,731
42	UCL <sub>1,95%</sub> %>OEL	75,778
31,2	<b>NORMAL PARAMETRIC STATISTICS</b>	
49,4	Mean	34,236
37,2	LCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	31,132
50,9	UCL <sub>1,95%</sub> - t statistics	37,340
	95th Percentile - Z	49,160
	UTL <sub>95%,95%</sub>	55,03
	Percent above OEL (%>OEL)	67,972

